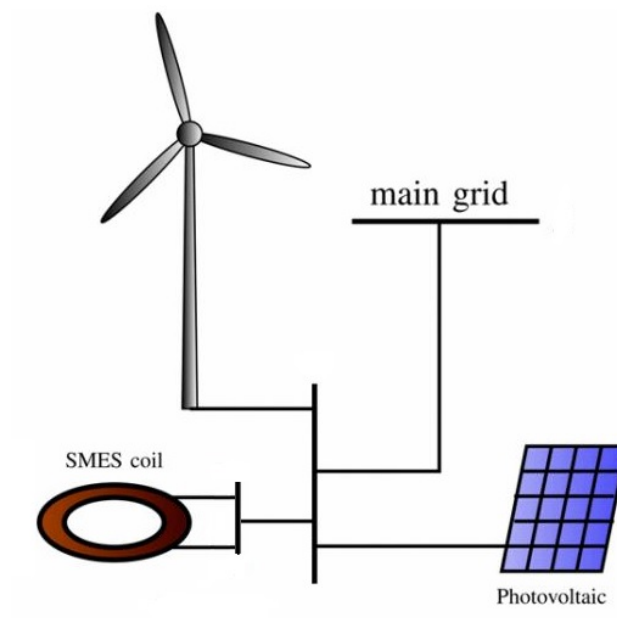


## Oscilaciones en micro-redes con generación eólica, solar y almacenamiento magnético por súper conducción.



Jonathan Ospina Jimenez  
Luis Antonio Restrepo Grajales



# **Oscilaciones en micro-redes con generación eólica, solar y almacenamiento magnético por súper conducción.**

Jonathan Ospina Jimenez  
Luis Antonio Restrepo Grajales

Trabajo de grado presentado como requisito  
parcial para optar al título de  
Ingeniero Electricista

Pereira, Junio de 2017  
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
Programa de Ingeniería Eléctrica.



Oscilaciones en micro-redes con generación eólica, solar y almacenamiento magnético por súper conducción.

©Jonathan Ospina Jimenez

Luis Antonio Restrepo Grajales

Director: Ph.D Alejandro Garcés Ruiz

Pereira, Junio de 2017

Programa de Ingeniería Eléctrica.

Universidad Tecnológica de Pereira

La Julita. Pereira(Colombia)

TEL: (+57)(6)3137122

*www.utp.edu.co*

Versión web disponible en: *<http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesisd/index.html>*

# Agradecimientos

- A DIOS por la fortaleza en todo este tiempo y por regalarme esos maravillosos padres.
- A mi madre Dora Grajales por su amor, su gran dedicación como madre y su esfuerzo incondicional para ayudarme a cumplir mis metas.
- A mi padre Rafael Restrepo que siempre fue mi motivación y a pesar de que hoy no se encuentra conmigo, quiero dedicarle este gran logro, para que como mi ángel guardián en el cielo se sienta muy orgulloso.
- A mi novia Luisa Pinzon por su gran paciencia y apoyo en los momentos mas difíciles.
- A mi familia que siempre estuvo a mi lado apoyándome.
- Al ingeniero Alejandro Garces por su colaboración y paciencia.
- A mi madre que me ha apoyado toda la vida a quien amo, admiro y valoro de gran manera.
- A mi novia quien siempre me ayudo y acompaño en todo momento.
- Al ingeniero Alejandro Garces por su disposición y colaboración
- A mi compañeros y profesores que también ayudaron para que este logro fuera posible.



# Resumen

Este trabajo propone un sistema de control capaz de mitigar las oscilaciones en una micro-red con alta penetración de energía eólica y solar fotovoltaica, con la ayuda de un elemento que almacena energía a través de un campo magnético generado por súper conducción. Con el fin de cumplir el proyecto, se implementa en el software de matlab un control que puede controlar la salida y entrada de potencia del sistema almacenador de energía hacia la micro-red y de esta manera contrarrestar las oscilaciones causadas por la alta variabilidad de las energías renovables. Se realizaron pruebas en una micro-red de 8 y 37 nodos considerando diferentes escenarios de alta generación y demanda, como también se mostraron diferentes escenarios con SMES de diferentes capacidades y considerando más de estos elementos en la micro-red, todo esto para comprobar la capacidad que tienen estos elementos para mitigar las oscilaciones a través de un buen control local.





# Tabla de Contenido

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Planteamiento del problema . . . . .	2
1.2	Justificación . . . . .	3
1.3	Objetivos . . . . .	4
1.3.1	General . . . . .	4
1.3.2	Especificos . . . . .	4
1.4	Estado del arte . . . . .	4
1.5	Estructura del trabajo de grado . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Micro-redes con generación eólica y solar</b>	<b>7</b>
2.1	Generación Distribuida . . . . .	7
2.2	Micro-red . . . . .	7
2.3	Generación eólica y solar . . . . .	9
2.3.1	Eólica . . . . .	9
2.3.2	Solar . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Almacenamiento de energía</b>	<b>11</b>
3.1	¿ Qué es y por qué es importante el almacenamiento de energía? . . . . .	11
3.2	Tecnologías de almacenamiento de energía . . . . .	12
3.2.1	Volantes de inercia . . . . .	12
3.2.2	Almacenamiento de energía hidroeléctrica de bombeo . . . . .	13
3.2.3	Almacenamiento de energía de aire comprimido . . . . .	13
3.2.4	Almacenamiento de energía por supercondensadores . . . . .	14
3.2.5	Almacenamiento de energía en baterías . . . . .	15
3.3	Almacenamiento magnético de energía por súper conducción . . . . .	16
3.3.1	Bobina súper conductora . . . . .	16
3.3.2	Sistema de enfriamiento . . . . .	17
3.3.3	Sistema de acondicionamiento de potencia . . . . .	18

<b>4</b>	<b>Metodología propuesta</b>	<b>19</b>
4.1	Implementación de un modelo de micro-red con generación eólica y solar . .	19
4.2	Aerogenerador . . . . .	19
4.3	Panel fotovoltaico . . . . .	21
4.4	Formulación Matemática . . . . .	22
4.4.1	Modelo del sistema . . . . .	22
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>29</b>
<b>6</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>45</b>
6.1	Futuros trabajos de investigación . . . . .	46
<b>7</b>	<b>Anexo A</b>	<b>47</b>

# Capítulo 1

## Introducción

Cada día aumenta el impacto ambiental por emisión de gases invernadero en la atmosfera terrestre producido por la generación de energía eléctrica con fuentes convencionales basadas en combustibles fósiles. La implementación de las energías renovables no convencionales como la generación eólica y solar fotovoltaica se proyecta como una alternativa viable para reemplazar la generación convencional. Este tipo de generación suele implementarse en forma distribuida con ventajas como: reducción de la contaminación, el costo por algún tipo de combustible es nulo y la cercanía a la demanda ahorraría el costo de construcción de redes de transmisión. Aunque los costos iniciales de instalación sean altos. Con los avances tecnológicos el precio de la generación distribuida se reduce cada día, en un futuro la masificación sera posible debido a un equilibrio de costo beneficio. La característica principal de este tipo de generación es la variación o fluctuación en la potencia de salida, ya que su fuente de energía depende de la radiación solar para la generación solar fotovoltaica y la velocidad del viento para la generación eólica. En la actualidad se plantean sistemas para integrar y operar los generadores distribuidos de una forma aislada o conectada con la red. Estos sistemas son llamados micro-redes, tienen grandes ventajas relacionadas con la eficiencia y la continuidad del suministro de energía eléctrica.

Una posible solución a los problemas de la generación distribuida asociados a la fluctuación de su potencia es la implementación de almacenadores de energía por superconducción magnética por sus siglas en ingles -*Superconducting Magnetic Energy Storage*-(SMES), con el fin de almacenar en tiempo de alta generación y ser aprovechado en momentos de alta demanda, es una buena opción por sus características de alta eficiencia y tiempos rápidos de respuesta en segundos.

La metodología empleada para afrontar esta situación es la implementación de un control local sobre la SMES para disminuir las oscilaciones de potencia activa sobre cada generador distribuido. Para de esta manera tener una potencia activa de salida en el generador distribuido lo más constante posible

## 1.1 Planteamiento del problema

En Colombia se cuenta con el agua como recurso primordial para la generación de energía eléctrica debido a que tiene una riqueza de recursos hídricos. Durante mucho tiempo la generación de energía hidroeléctrica ha sido la forma más eficiente y económica de proveer energía eléctrica al país. Esto a su vez ha originado una gran dependencia en este tipo de generación, ocasionando algunos problemas de abastecimiento de energía eléctrica en tiempos de sequía. Una solución a este problema sería la integración de sistemas de generación con energías renovables que permitan diversificar la matriz energética, sin embargo estos sistemas cuentan con algunas limitantes tales como: los altos costos de implementación y los problemas de oscilaciones en la red causados por la alta penetración de estas energías [1]. Esto conlleva a que deba implementarse una estrategia en conjunto con las energías renovables que pueda reducir los problemas de oscilaciones en la red y garantizar un sistema confiable y seguro.

Los sistemas de almacenamiento de energía magnética por superconducción (SMES) se presentan como una de las tecnologías de almacenamiento de energía más viable en el mercado, por su rápida respuesta y eficiencia [1]. Las investigaciones realizadas en las áreas de aplicación de las SMES han mostrado resultados importantes en: estabilidad dinámica, estabilidad transitoria, estabilidad de voltaje. [1]. En otras áreas importantes de estudio como las energías renovables y las micro-redes se tienen resultados en cuanto a: 1) El desarrollo tecnológico de los elementos necesarios para la implementación de las energías renovables, lo que permite que se reduzca su costo de implementación y se pueda ratificar como una forma muy viable para la generación de energía eléctrica en el país. 2) El avance en la reducción de la inestabilidad en las micro-redes dependiendo de su tipo de conexión [2]. Hasta el momento una de las principales dificultades que se tiene para la implementación es la poca información acerca de la integración y funcionamiento detallado de estos sistemas operando en conjunto.

La generación de energía eólica y solar en nuestro país representa un gran reto debido a que este tipo de generación depende de un recurso estocástico imposible de controlar. Esta limitante implica, que deba tenerse un sistema de almacenamiento de energía como las SMES, que permita hacer uso de la energía en el momento preciso que se requiera sin importar las condiciones del viento y de la radiación solar, lo cual puede dar viabilidad a la implementación de estos sistemas como posible alternativa para mejorar los problemas de estabilidad en la micro-red.

Este trabajo de grado pretende mitigar los efectos de oscilación en una micro-red con alta penetración de generación eólica y solar, a partir del desarrollo de un sistema de control que permita tener dominio sobre la cantidad de energía almacenada en las SMES. Con este control se podrá brindar un soporte en las oscilaciones de la micro-red ante cambios en la

demanda o en la generación.

## 1.2 Justificación

La importancia de tener un sistema eléctrico colombiano inteligente, seguro y confiable con respecto a problemas como: la generación de energía eléctrica y la inestabilidad que se puede tener en la red, ha llevado a efectuar estudios acerca de sistemas que puedan eliminar o reducir estos problemas. Con esta visión se han realizado investigaciones de nuevas formas de generación y almacenamiento de energía eléctrica debido a que la no implementación de estos sistemas puede generar futuros problemas de abastecimiento de energía eléctrica en el país.

La implementación de una red que integre generación eólica y solar con almacenamiento de energía es compleja debido al modelamiento de cada uno de los sistemas, en especial el de SMES. Este es un sistema nuevo en el mercado colombiano, sobre él existen pocos estudios técnicos y la información disponible en bases de datos es escasa. Lo que hace que la información no sea suficiente para su adecuada implementación. Las micro-redes hacen parte del desarrollo Smart Grid. pero, aunque se han estudiado y se tiene información en Colombia acerca de estas, siguen teniendo escasa implementación debido a altos requerimientos tecnológicos con los que se debe contar para su adecuado funcionamiento.

Con base en lo mencionado anteriormente, la herramienta que permite llevar a cabo el análisis del proyecto es la de un programa que permita simular el sistema planteado con los parámetros más adecuados, para obtener resultados próximos al sistema real. Debido a la falta de información de algunos parámetros fundamentales en los sistemas a simular, puede llegarse a generar problemas con la ejecución del sistema de simulación que va representar el modelo del proyecto. Tales problemas pueden ser: inexactitudes en los valores obtenidos, retrasos en el tiempo de ejecución.

En otros países se han implementado algunos sistemas de almacenamiento de energía eléctrica tales como: volantes de inercia *Flywheel Energy Storage System*-(FESS), sistemas hidroeléctricos de almacenamiento por bombeo, almacenamiento de energía en baterías *Battery Energy Storage System*-(BESS) [1]. Estos no son eficientes comparados con las características de las SMES, características tales como: ciclo de vida del sistema, límites de voltaje y corriente, tiempo de carga y descarga. Se requiere por tanto de un sistema que ofrezca mayor eficiencia y que pueda cumplir con todas las necesidades del sistema. Las SMES cuenta con parámetros que permiten un desempeño superior a los reportados en prototipos anteriores [1],[3],[4], además de otras características que hacen que sea una de las formas de almacenamiento

de energía más óptima y viable en cualquier sistema eléctrico donde se requiera.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 General

- Mitigar las oscilaciones en micro-redes con generación eólica, solar y almacenamiento magnético por super conducción.

### 1.3.2 Especificos

- Alcanzar el estado del arte en sistemas SMES, micro-redes y control.
- Implementar un modelo de micro-red con generación eólica y solar.
- Modelar el sistema de conversión del SMES.
- Desarrollar un control para reducir los efectos oscilatorios en la micro-red.
- Analizar y reportar resultados.

## 1.4 Estado del arte

Algunos autores en [2] han estudiado las causas del fenómeno de las oscilaciones en las micro-redes y otros en [2],[5],[6],[7], han tratado de controlarlo mediante la introducción de dispositivos que puedan ayudar a contrarrestar estos efectos indeseados en la micro-red. Las oscilaciones en una micro-red depende de muchos aspectos tales como: tipo de conexión, topología de control, parámetros de la red, fuentes de compensación, [2]. Como bien sabemos en las micro-redes se tiene generación distribuida lo que permite tener alto impacto de energías renovables, en nuestro caso generación solar y eólica, la eólica es otro causante de este fenómeno con las fluctuaciones del viento en su naturaleza, las cuales producen que la potencia de salida y la tensión del aerogenerador en el terminal también fluctúen de forma aleatorio provocando grandes oscilaciones en la micro-red [8].

Uno de los dispositivos que se introduce para controlar este fenómenos son las SMES, las

cuales tienen características excelentes y cuentan con la capacidad de poder descargar grandes cantidades de energía durante un pequeño periodo de tiempo. Además, pueden realizar un número ilimitado de ciclos de carga y descarga [3],[4]. Con base en esto se plantean varios estudios de sistemas de control que permitan la introducción de estos dispositivos a la micro-red y permitan mitigar las oscilaciones.

En muchos de los estudios realizados como en [5], [6], [9], se hace referencia al sistema de control por lógica difusa *fuzzy logic controllers*-(FLC) que puede controlar los parámetros principales de los dispositivos SMES para el uso de la energía eólica. De esta misma manera en [10] se ratifica este dispositivo FLC, con el cual se controla el intercambio de potencia entre la micro-red y las SMES, además se presenta cada uno de los modelos con los cuales son representados los dispositivos principales para la simulación de este proyecto, los cuales son: los sistemas de conversión de energía *wind energy conversion system*-(WECS), los *Photovoltaics*-(PV) y las SMES, que serían un gran soporte a la hora de realizar la simulación respectiva del proyecto.

Entrando más en detalle acerca de los valores que deben tomar los parámetros del controlador que se diseñe, en [7] se propone un diseño robusto del controlador de la SMES basado en un modelo aditivo inverso que representa las incertidumbres del sistema como la variación de los parámetros del modelo, después para ajustar los parámetros del controlador y encontrar los valores más óptimos, se utiliza el método enjambre de partículas *particle swarm optimization*-(PSO) para resolver la optimización de los parámetros del controlador y tomar los mejores valores según corresponda.

## 1.5 Estructura del trabajo de grado

El trabajo de grado está organizado de la siguiente forma. En el capítulo 1 se presenta la base del trabajo de grado mostrando el problema a tratar y como debe llegarse a una posible solución a partir de toda la teoría consultada acerca del tema. El capítulo 2 expone todo el fundamento teórico acerca de las micro-redes, los elementos asociados a la generación distribuida y las energías renovables. El capítulo 3 muestra las diferentes tecnologías de almacenamiento de energía enfocándose especialmente en todo el funcionamiento de las SMES. El capítulo 4 detalla la metodología implementada en la versión de prueba de Matlab. Posteriormente en el capítulo 5 se analizan y se muestran los resultados obtenidos a partir de la versión de prueba con el sistema de control local. Finalmente en el capítulo 6 se presentan las conclusiones.





## Capítulo 2

# Micro-redes con generación eólica y solar

### 2.1 Generación Distribuida

En la actualidad, las centrales de generación de energía se encuentran a largas distancias de las grandes ciudades lo que hace necesario la construcción de sistemas de transmisión para alimentarlas, en consecuencia aumenta los costos para los operadores de red. Los sistemas de energía eléctrica podrían disminuir los costos, construyendo la generación próxima a los centros de consumo.

El constante crecimiento de la carga y el enfoque de un sostenible medio ambiente hacen necesaria la implementación de la generación distribuida. El sistema de energía eléctrica enfrenta retos considerables y significativos cambios en todos sus niveles: Generación, Transmisión, Distribución y consumidor final, porque las redes están cambiando desde perspectivas meramente pasivas a totalmente activas, donde existan flujos bidireccionales. Para que se puedan realizar estos cambios se hace indispensable las “micro-redes” [11].

### 2.2 Micro-red

Una micro-red es un sistema integrado de energía que contiene generación distribuida, cargas eléctricas y dispositivos almacenadores de energía que asociados operan en un red de distribución, supliendo en su totalidad la energía en la carga, esto significa que esos generadores y cargas estas geográficamente cerca [12]. La generación distribuida está compuesta de generadores no convencionales como paneles fotovoltaicos, generadores eólicos, pequeñas centrales hidroeléctricas, microturbinas entre otros. En la figura 2.1 se observa un diagrama unifilar de cómo estará

constituida una microred con los generadores distribuidos como los mencionados anteriormente y también la interacción con los grandes centros de demanda y los generadores convencionales.

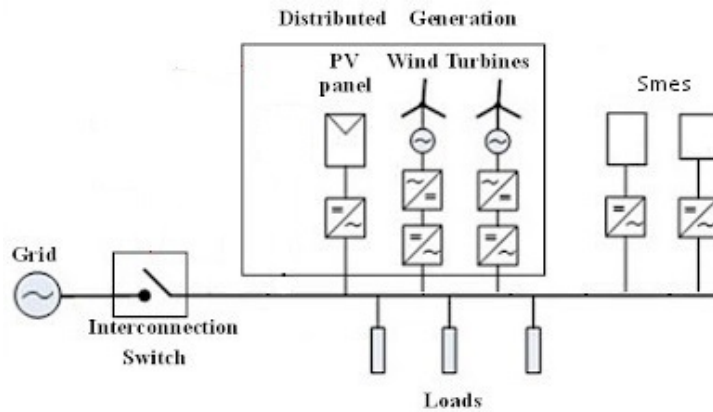


Figure 2.1: Diagrama unifilar de una micro red con generación distribuida [13]

Estos desempeñan un importante rol en el futuro de los sistemas de energía eléctrica, disminuyendo en gran medida las emisiones CO<sub>2</sub> a la atmósfera generada por las centrales térmicas basadas en combustibles fósiles.

El desarrollo del concepto de micro-red es prometedor para los sistemas de energía eléctrica debido al número de ventajas que proporciona en varios niveles:

La reducción eléctrica y física entre la generación y la carga puede contribuir a mejorar el manejo de potencia reactiva y así mejorar los perfiles de voltaje, reducción en los alimentadores sobrecargados en transmisión y distribución. Así mismo, disminuir las pérdidas en ambos sistemas. Mejorar la calidad de energía y confiabilidad particularmente logrando mejor relación entre oferta y demanda, mejorar los perfiles de voltaje en caso de caída o sobre tensión a través de reguladores de voltaje.

El impacto del medio ambiente en la generación distribuida será menor con respecto a las grandes centrales de generación convencionales. También, los principales beneficios de las micro-redes en este tema son: la cercanía física entre los consumidores y los generadores incrementará la conciencia del consumidor hacia un uso racional de la energía, reducción de los gases de efecto invernadero mitigando las barreras técnicas relacionadas con el poco conocimientos técnico y la poca experiencia para operar.

Varios retos y potenciales desventajas enfrentan el desarrollo de las micro-redes como esas barreras técnicas relacionadas con el poco conocimiento técnico y experiencia para operar

y controlar un significativo número de unidades de generación distribuida. Sin embargo, algunas de esas dificultades técnicas fomentan la investigación de nuevos proyectos como en Europa Estados Unidos y Asia [14].

Los modos de operación de las micro-redes se estudian para mejorar la eficiencia de los sistemas de energía. Con el modo de operación modo normal, la micro-red está conectada eléctricamente con un red de distribución ya sea supliendo la energía en su totalidad o parcialmente o inyectando energía a una red de distribución principal [11]. En este modo de operación se deben controlar los inversores para asegurar un flujo de potencia activa y reactiva adecuada, conservando calidad y fortaleza ante posibles fallas externas ya sea por desastres naturales o acciones terroristas. En el modo de emergencia, ante una falla en la red de distribución principal, la micro-red debe estar en la capacidad de operar en modo isla, es decir, trabajando autónomamente.

Para realizar el diseño de las micro-redes cuesta una cantidad considerable de recursos e investigación para desarrollar tecnologías que puedan aprovechar de forma eficiente la energía suministrada por los generadores. En el caso de los generadores eólicos y paneles fotovoltaicos, se requiere una interfaz adicional para integrarlos adecuadamente a la red de distribución, esto es logrado por medio de los dispositivos inversores.

## 2.3 Generación eólica y solar

Las energías renovables como la eólica y la solar, son a veces vistas como alternativas costosas de generar electricidad pero amigables con el medio ambiente. Sin embargo, estas opiniones no tienen en cuenta los beneficios a largo plazo de estas fuentes de energía renovables. La energía eólica en el contexto de las micro-redes se convierte importante debido principalmente tres factores: economía, medio ambiente y madurez. El rápido desarrollo de las celdas fotovoltaicas, la continua reducción de los costos asociados a los módulos fotovoltaicos, y los avances en electrónica de potencia han sido los principales motivos para la implementación de este tipo de generación. [15].

### 2.3.1 Eólica

En un sistema de energía eólica la entrada es el viento, que la turbina convierte en energía mecánica. Luego, la turbina impulsa un generador, que esta controlado por convertidores electrónicos de potencia. Una etapa de conversión de energía eléctrica permite que las corrientes de salidas estén en fase con los voltajes de la red. En general, para maximizar la

energía generada, se debe emplear un esquema de seguimiento de potencia máxima (MPPT) para controlar la velocidad de la turbina eólica y / o el ángulo de paso. Claramente, la potencia fluctúa a medida que cambia la velocidad del viento de entrada. Dependiendo de la impedancia de la red distribuida, la fluctuación de potencia puede afectar la estabilidad de todo el sistema, por ejemplo, influir en las variaciones de voltaje. Actualmente, el uso de convertidores electrónicos de potencia es inevitable. Proporcionan controlabilidad de la potencia eléctrica y permiten la implementación de funciones avanzadas (por ejemplo, mejorar la capacidad de recuperación). Finalmente, se usa un transformador para aumentar el nivel de voltaje de modo que se logre una transmisión de potencia más eficiente en la red distribuida[16].

### 2.3.2 Solar

A diferencia de la energía eólica, la energía solar fotovoltaica como entrada no implica conversión mecánica. En cambio, la generación de energía se logra explotando el efecto fotovoltaico que convierte la energía solar en energía eléctrica. Debido a que las partes mecánicas de la turbina eólica se desgastan, la generación solar es más confiable que la generación eólica. No obstante, ambas tecnologías comparten las mismas etapas de conversión eléctrica. Es decir, la electrónica de potencia es la clave para la conversión eficiente y confiable de la energía solar, que depende en gran medida de las condiciones ambientales (por ejemplo, nivel de irradiancia solar y temperatura ambiente). Por lo tanto, de forma similar, se pueden lograr muchas funciones avanzadas en la generación solar en una microred través del control de los convertidores electrónicos de potencia. Por ejemplo, la máxima extracción de potencia de los paneles fotovoltaicos en respuesta a condiciones climáticas extremas, anti-isla (AI), el avance de fallas de red distribuidas, entre otras. Se puede lograr controlando adecuadamente los convertidores fotovoltaicos [16].

# Capítulo 3

## Almacenamiento de energía

### 3.1 ¿Qué es y por qué es importante el almacenamiento de energía?

El almacenamiento de energía está definido como el grupo de métodos necesarios que se tiene en la actualidad para conservar cierta cantidad de energía en cualquier forma y luego ser liberada cuando se requiera en la misma forma en que se obtuvo, o en otra forma diferente de energía. El almacenamiento de energía tiene un objetivo principal: el cual consiste en maximizar la integración de fuentes de energías renovables, permitiendo diversificar la matriz energética del país y brindar una mayor eficiencia y seguridad en el sistema eléctrico. Con este énfasis la generación de energía eléctrica no tendría que producirse en el momento en que la demanden los consumidores, por ejemplo no habría que parar el funcionamiento de los aerogeneradores cuando haya viento por la noche, sino que sería posible recuperar la energía generada y almacenarla para su utilización en algún momento donde se tenga un pico de demanda en el sistema. De esta misma manera pero a una escala menor puede aplicar el caso de los paneles solares fotovoltaicos domésticos, en los cuales se aprovechan las horas del mediodía donde se tiene más radiación del sol, pero si las personas no se encuentran en estos momentos para aprovechar esta energía, esa energía podrá ser almacenada con un equipo almacenador de energía, para poder ser utilizada en otro momento. Básicamente estas son algunas de las características que hacen tan importante el almacenamiento de energía como base para un sistema eléctrico confiable y más amigable con el medio ambiente.

## 3.2 Tecnologías de almacenamiento de energía

El aumento de la descentralización de generación de energía eléctrica, combinado con la alta penetración de fuentes renovables intermitentes ha producido un aumento en la dificultad de estabilizar la red eléctrica, lo cual se ve reflejado en la alteración de la frecuencia del sistema que describe el desequilibrio entre la oferta y la demanda. Debido a todo lo mencionado, el almacenamiento de energía eléctrica se ha convertido en una necesidad, por lo cual la electricidad en su forma no almacenable necesita convertirse en una forma más estable de energía que se pueda almacenar con la intención de transformarla nuevamente en energía eléctrica cuando se requiera [13]. Existen varias tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica y se pueden agrupar de la siguiente manera: almacenamiento de energía mecánica, almacenamiento de energía química, almacenamiento de energía electroquímica, almacenamiento magnético de energía.

### 3.2.1 Volantes de inercia

Este dispositivo almacena energía en forma cinética por el movimiento de un rotor (masa giratoria), el cual por lo general es de muchas toneladas lo que le permite tener una gran inercia. El rotor está conectado al motor/generador a través de un eje y en su fase de carga la energía eléctrica se utiliza para acelerar el motor el cual a través de la rotación del eje transfiere un momento angular al rotor, que actúa como el órgano de almacenamiento de energía. En su fase de descarga donde se desea entregar la energía almacenada, el motor se desconecta e inmediatamente pasa a trabajar como generador a su vez el rotor queda girando por su inercia y de esta manera transfiere la energía cinética almacenada al generador, el cual la transforma en energía eléctrica lista para utilizarse. Estos volantes son generalmente clasificados en dos clases basados en la velocidad de rotación: a) Volantes de baja velocidad son aquellos con velocidad de rotación de menos de 10000 rpm, lo cual les proporciona un breve periodo de almacenamiento con capacidades de alta potencia. b) Volantes de alta velocidad son aquellos con velocidades de rotación mayores de 10000 rpm y esto les permite tener un largo periodo de almacenamiento con capacidades de baja potencia. En términos de coste de funcionamiento y operatividad, volantes son considerados como modelo perfecto de dispositivo de almacenamiento de energía debido a su bajo coste de mantenimiento, ciclo de vida largo, alta eficiencia, amplio rango de temperatura de funcionamiento. Sin embargo, como resultado de las pérdidas de fricción, los volantes no son buenos almacenadores de energía a largo plazo y la presencia de fuerzas de fricción reduce la eficiencia del dispositivo durante la operación del volante [13].

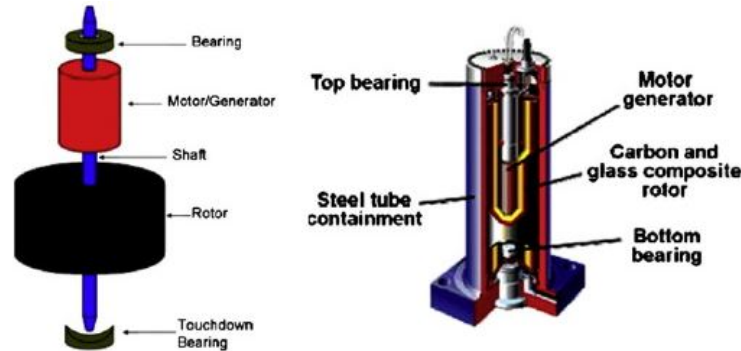


Figure 3.1: Partes de un volante de inercia [13]

### 3.2.2 Almacenamiento de energía hidroeléctrica de bombeo

El almacenamiento de energía hidroeléctrica de bombeo por sus siglas en inglés- *Pumped Hydroelectric Energy Storage*-(PHES) constituye la forma más madura y ampliamente utilizada a gran escala de la tecnología de almacenamiento de energía. Se almacena la energía eléctrica en forma de energía potencial mediante el bombeo de agua hasta un reservorio más alto, usando la energía eléctrica en la mayoría de los casos de fuentes de energía renovables para alimentar los motores de las bombas que permiten conducir el agua hasta los depósitos cuesta arriba, donde se va almacenar esa energía intermitente en una forma de energía más estable y luego será liberada cuesta abajo hasta la parte inferior del depósito, donde pasara por un generador que transformara esa energía en energía eléctrica de una forma más estable para la red y el consumo de todas las personas. Este sistema proporciona energía fiable dentro de un corto periodo de tiempo (normalmente en menos de 1 min), su eficacia está en el rango de 65-85 por ciento, estos sistemas pueden incorporarse a lagos naturales, ríos o embalses. Actualmente hay más de 150 plantas con 22000 MW de capacidad en los estados unidos y 78000 MW de capacidad instalada en todo el mundo. Una limitación de este sistema es la necesidad de tener varias características geológicas naturales, incluyendo el adecuado cierre de terrenos y teniendo en cuenta la elevación adecuada, además de que debe haber un suministro adecuado de agua [13].

### 3.2.3 Almacenamiento de energía de aire comprimido

El almacenamiento de energía de aire comprimido por sus siglas en inglés- *Compressed Air Energy Storage*-(CAES) es utilizado con fuentes de energía renovables o con sistemas de energías no renovables pero fuera de las horas pico, donde se utiliza la energía eléctrica para alimentar los compresores que se encargan de tomar el aire de la atmósfera para comprimirlo

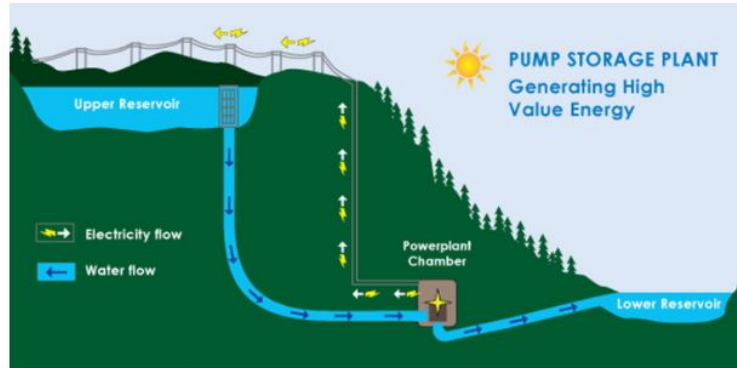


Figure 3.2: Partes de un sistema de almacenamiento de energía hidroeléctrica de bombeo [13]

y almacenarlo en algunas cavidades en el subsuelo o cavernas subterráneas. Este aire puede ser liberado cuando se requiera, por lo general en las horas de mayor demanda (horas pico) y es llevado a una turbina-generator para producir energía eléctrica de una forma más confiable sin intermitencias. Esta tecnología cuenta con una estimado en eficiencia del 70 por ciento, con una duración de aproximadamente unos 40 años y el diagrama del proceso se describe en la figura 3.3.

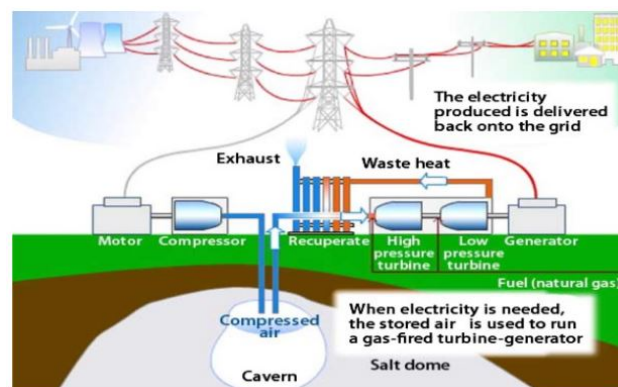


Figure 3.3: Partes de un sistema de almacenamiento de energía de aire comprimido [13]

### 3.2.4 Almacenamiento de energía por supercondensadores

Estos dispositivos son conocidos como condensadores eléctricos de doble capa los cuales fueron desarrollados para reemplazar las baterías de Li-ion que sufren de lentitud en sus etapas de



carga y descarga, además de tener una duración limitada. Los avances y desarrollos que se han realizado para aumentar la capacidad de almacenamiento de energía en comparación con los condensadores convencionales, viene dada por: sustituir el común dieléctrico sólido entre los electrodos, por el uso de una solución de electrolito colocada entre dos conductores sólidos, lo cual le proporciona a los scs mayor capacitancia y densidad de energía. Estos dispositivos almacenan energía en las dos series de los condensadores eléctricos de doble capa que se forma entre cada uno de los electrodos y el electrolito, además de ser capaces de almacenar gran densidad energética y poder responder a cualquier cambio en la demanda de energía de decenas a cientos de milisegundos [13]. Todo esto le proporciona una eficiencia al dispositivo del 95 por ciento. La figura 3.4 muestra el diagrama esquemático del supercondensador.

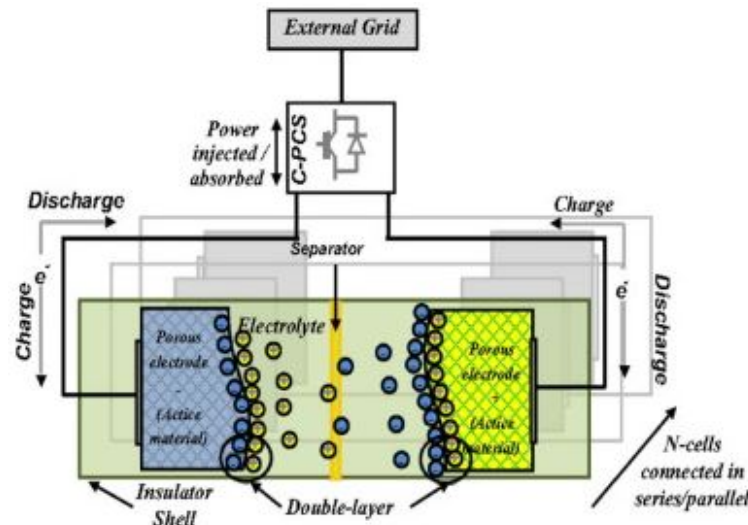


Figure 3.4: Partes de un sistema de almacenamiento de energía por supercondensadores [13]

### 3.2.5 Almacenamiento de energía en baterías

La batería recargable está considerada como el más antiguo dispositivo de almacenamiento de energía eléctrica, que almacena la electricidad como energía química. Es un dispositivo que está conformado generalmente por varias celdas y cada una con 2 electrodos, las celdas están formadas por varias placas que forman una especie de rejilla y sumergidas con un baño químico de agua con ácido sulfúrico, el cual actúa como electrolito (sustancia conductora) que reacciona con los productos químicos contenidos en las placas y con estas reacciones electroquímicas permitir la circulación de electrones y obtener la electricidad. Las baterías están construidas en diferentes tamaños con capacidades que oscilan entre menos de 100 W a

varios MW, la tecnología del sistema de batería es el dispositivo de almacenamiento de energía más generalizado para la aplicación del sistema de alimentación, aparte de la red eléctrica, su aplicación de almacenamiento de energía abarca sectores como los vehículos eléctricos, misiones aeroespaciales, operación de sistemas electrónicos portátiles y los sistemas de red inalámbricos. Las baterías vienen en diferentes variedades dependiendo de su aplicación, por ejemplo las baterías de ciclo profundo son las más utilizadas comúnmente en la aplicación de sistemas de potencia y cuenta con una eficiencia de 70-80 por ciento [13].

### 3.3 Almacenamiento magnético de energía por súper conducción

Los dispositivos SMES almacenan energía de la misma forma que un inductor convencional, ambos almacenan energía en el campo magnético creado por las corrientes que fluyen a través de un alambre bobinado. La principal diferencia radica que el SMES utiliza un alambre súper conductor por el cual fluye una corriente directa. Para que el alambre sea súper conductor está sometido a temperaturas criogénicas, por lo cual no muestra ninguna resistencia conductiva. Una unidad típica de SMES consta principalmente de: la bobina súper conductora, el sistema de refrigeración como se muestra en la figura 3.5 y el sistema de acondicionamiento de potencia como el mostrado en la figura 3.6 [13].

#### 3.3.1 Bobina súper conductora

Los materiales que muestran buena capacidad de superconductividad se han ido desarrollando cada vez más con el paso del tiempo, pero la cantidad de los materiales súper conductores que se utilizan en la mayoría de aplicaciones a altos niveles de potencia sigue siendo muy limitada, debido a los diferentes valores críticos en sus parámetros principales algunos pueden ser más adecuados para este tipo de aplicación, por este motivo la aleación de Niobio-Titanio (Nb Ti) sigue siendo la más utilizada [17], por su capacidad de transportar altos niveles de corrientes en la presencia de altos niveles de campos magnéticos a bajas temperaturas, sin exceder los valores críticos de los parámetros de: temperatura, densidad de flujo magnético y densidad de corriente. El contenido energético en un campo electromagnético es determinado por la corriente que fluye a través de las espiras de una bobina magnética y puede ser calculado con la siguiente ecuación.

$$W_m = \frac{1}{2} Li^2 \quad (3.1)$$

Para obtener altos valores de energía almacenada se necesita modificar alguno de los dos parámetros de la ecuación, sea el valor de la inductancia (L) o el valor de la corriente (i). La

corriente (i) viene limitada por el súper conductor utilizado, por tal motivo este parámetro no se puede aumentar, lo que nos lleva a incrementar la inductancia; lo cual se puede hacer utilizando la geometría adecuada. Las configuraciones más conocidas son: solenoide sencillo y toroidal. La modificación del parámetro de inductancia se realiza modificando la geometría del inductor, lo cual afecta la masa total de la estructura del SMES haciendo que el peso total del dispositivo sea mayor

### 3.3.2 Sistema de enfriamiento

El sistema de enfriamiento del dispositivo SMES está compuesto por el refrigerador, en donde se prepara el refrigerante y el contenedor criogénico en donde se ubicada la bobina superconductora para posteriormente ser refrigerada y aislada térmicamente del medio ambiente. Este sistema utiliza generalmente como refrigerante el helio, ya sea por circulación forzada o como baño de helio. Este refrigerante permite asegurar que la temperatura del superconductor no exceda la temperatura crítica del mismo, pero dado que la planta de refrigeración posee una eficiencia límite, las tuberías y soportes mecánicos pueden ser penetrados por el calor lo cual puede ser inadecuado para el funcionamiento del sistema, por tal motivo se provee de un enfriamiento intermedio llamado escudo térmico que intenta disipar el calor en estos espacios. El refrigerante consume una considerable cantidad de energía para lograr el estado criogénico, además de que la corriente debe fluir a través de materiales superconductores e interruptores de estado sólido que causan pérdidas resistivas, la eficiencia global en aplicaciones comerciales en el rango de MW es muy alta [13]. Un sistema de refrigeración típico requiere aproximadamente 1.5 kW por mega watt-hora de energía almacenada [18].

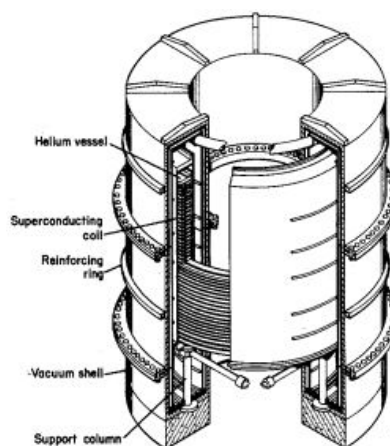


Figure 3.5: Bobina super conductora dentro de un contenedor criogénico de helio, con capacidad de almacenar 100MJ de energía [19]

### 3.3.3 Sistema de acondicionamiento de potencia

Un sistema de acondicionamiento de potencia (PCS) es el encargado de controlar la transferencia de potencia entre la bobina superconductora y el sistema de corriente alterna. Según la topología, existen 3 tipos de PCS para los dispositivos SMES: PCS basado en tiristores, PCS basado en convertidor de fuente de voltaje (VSC) y el convertidor de fuente de corriente (CSC). Las SMES basadas en tiristores pueden controlar principalmente la potencia activa y tiene una pequeña capacidad para controlar la potencia reactiva, por otro lado las SMES basadas en VSC o CSC pueden controlar las potencias activas y reactivas de forma independiente y simultánea [1]. El PCS más utilizado para los sistemas SMES es el basado en los convertidores de fuente de corriente, tal como se muestra en la figura 3.6. El sistema está compuesto por un CSC con modulación de ancho de pulso PWM-CSC y un transformador de tres fases. Entre los PWM-CSC y el transformador trifásico un banco de condensadores está conectado para filtrar los armónicos producidos por la conmutación. La Bobina de la SMES está directamente conectada con el lado dc [20].

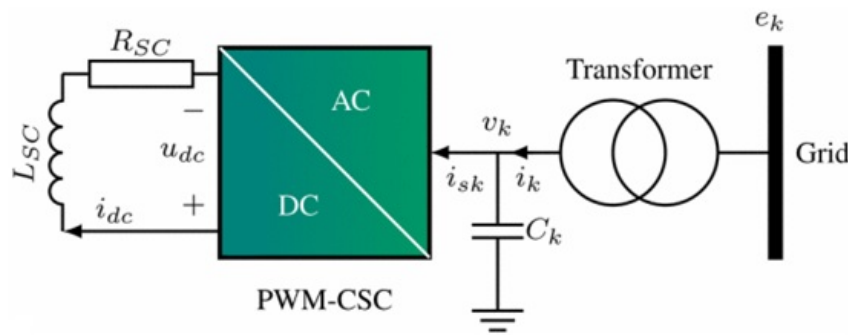


Figure 3.6: Clásica conexión de la SMES usando PWM-CSC [20]

# Capítulo 4

## Metodología propuesta

### 4.1 Implementación de un modelo de micro-red con generación eólica y solar

El modelo base de micro-red simulado, se tomó del sistema IEEE 37 nodos desbalanceado, el cual está actualmente en California [21]. A este sistema se le realizó una doble transposición con la cual el sistema se puede tomar como balanceado.

En el primer sistema de prueba se tomaron 8 nodos del sistema principal IEEE 37 nodos balanceado conservando el nodo slack y con los siguientes parámetros base:

- Voltaje: 4.8 kV
- Potencia: 2500 kVA

En el montaje del sistema de generación distribuida con generación eólica y solar, lo primero que se realizó fue la selección de un tipo de aerogenerador y un tipo de panel fotovoltaico.

### 4.2 Aerogenerador

Se realizó el primer sistema de prueba con las especificaciones de un aerogenerador de Argolabe Ingeniería T100 kW, el cual nos proporciona los siguientes valores para realizar la simulación:

Tabla 4.1: Características del aerogenerador T100kW

Variable	Unidad
Potencia	100 kW
Velocidad de conexión	3 m/s
Velocidad nominal	10.5 m/s
Velocidad de corte	20 m/s

Con estos parámetros se procede a realizar las condiciones necesarias para determinar la potencia entregada por el aerogenerador. Esta potencia viene determinada por la siguiente ecuación.

$$p = p_{nom} \left( \frac{v_{ed}}{v_{nomin}} \right)^3 \quad (4.1)$$

$p_{nom}$ : Potencia nominal del aerogenerador.

$v_{ed}$ : Velocidad del viento por intervalo de segundos.

$v_{nomin}$ : Velocidad nominal del aerogenerador,

De todos los elementos que se encuentran en la ecuación, solo falta definir ( $v_{ed}$ ) que corresponde a la velocidad del viento en cada segundo. Estas velocidades fueron tomadas de un estudio realizado y a partir de estos datos , y con ayuda de las condiciones que se describen a continuación, se puede obtener la cantidad de potencia entregada a la red por el aerogenerador en unidades de por unidad.

$v_{ed} < 3$  : Cuando la velocidad del viento es inferior a 3 m/s la potencia generada por el aerogenerador va ser 0, debido a que a esas velocidades el aerogenerador no tiene la capacidad de extraer la energía necesaria del viento para iniciar el movimiento de sus aspas y poder generar energía eléctrica.

$v_{ed} > 3$  y  $v_{ed} < 10.5$ : Cuando la velocidad del viento se encuentra entre estos dos intervalos la potencia del aerogenerador depende puntualmente de la velocidad del viento en ese instante y se calcula con la ecuación 4.1 de arriba, debido a que 3 m/s es la velocidad mínima de generación y 10.5 m/s es la velocidad nominal de generación.

$v_{ed} > 10.5$  y  $v_{ed} < 20$ : Debido a la curva de funcionamiento del aerogenerador T100 entre estos intervalos de velocidades de viento, el aerogenerador entrega una potencia constante y para este caso es la máxima potencia de generación.

$v_{ed} > 20$  : Después de esta velocidad la maquina tiene un sistema de control que se activa ante velocidades del viento tan altas, para proteger todo los componentes del aerogenerador. A estos controles se le conoce como control pitch que es el encargado de la variación de incidencia del aire en las aspas modificando el Angulo de ataque de las mismas. y el control yaw que permite el movimiento del rotor.

### 4.3 Panel fotovoltaico

Para este sistema se utilizó un panel solar con una potencia de salida de 1000 W.

Para la potencia de entrada se utilizó la radiación medida en septiembre de 2014 en la universidad Tecnológica de Pereira donde se midieron valores de radiación cada 5 minutos durante los 30 días del mes de Septiembre, para nuestro análisis en la simulación se tuvo un alcance de hasta 120 segundos, por lo tanto los datos para el sistema de prueba fueron tomados el día de máxima radiación solar del mes en las horas pico máxima del día.

Las características más específicas del panel fotovoltaico como la tensión máxima pico a pico ( $V_{mpp}$ ), la corriente máxima pico a pico ( $I_{MPP}$ ), el tipo de conexión, la cantidad de paneles; no fueron tenidos en cuenta, dado que para el interés de la simulación es conocer cuánto es la variación de la potencia de salida del panel ante la variación de la radiación solar existente.

Después de la selección del aerogenerador y el panel fotovoltaico se procede a trabar con el sistema de prueba, en el cual se van a encontrar voltajes y corrientes por medio de un scrip que va resolver el flujo de carga del sistema, con el cual se obtienen una serie de datos de voltaje, corriente y potencia en cada uno de los 7 nodos en un intervalo de 120 segundos. Estos datos son la base para encontrar la potencia que se desea compensar en alguno de los nodos o en la mayoría de los casos en el nodo slack.

Después de tener el valor al cual se quiere mantener constante la potencia o en su defecto sin la mayor intermitencia posible, se debe implementar un SMES capaz de absorber o entregar

energía según corresponda en cada intervalo de tiempo. Teniendo el valor exacto que la SMES debe compensar o absorber se entra a analizar los límites operativos de la smes tanto en potencia como en energía.

El Almacenador de energía por superconducción (SMES) tiene un valor máximo de absorción de energía y un valor máximo de entrega de esa energía, por ende se definen unos límites tanto para Potencia (PB) como para Energía (Eb).

Las características generales del SMES utilizados son las siguientes [22]:

Tabla 4.2: Características de la SMES utilizada en la simulación

Variable	Unidad
Corriente por el inductor	60 A
Energía almacenada	14.4 kJ
Inductor	8 H
Tasa de cambio de la potencia	40 kVA

## 4.4 Formulación Matemática

### 4.4.1 Modelo del sistema

#### Método de barrido iterativo

La solución del flujo de potencia radial trifásico, es el método de barrido iterativo el cual se realiza en dos etapas consecutivas; en la primera se utiliza la primera ley de Kirchhoff desde los nodos finales hasta el nodo Slack (barrido hacia adelante), esta se denomina barrido de corrientes, para esta etapa se debe inicializar con voltajes planos o que es lo mismo a  $1 \angle 0$ . Luego, se utiliza la segunda ley de Kirchhoff se aplica desde el nodo Slack hasta el nodo final, se utilizan los valores de corrientes encontradas en el barrido de corrientes, de este modo se obtienen los nuevos valores de voltaje nodal. Las dos etapas realizadas anteriormente conformar una iteración del método; la convergencia consigue cuando la diferencia de pérdidas activas entre dos iteraciones contiguas es menor a un error predeterminado. Los pasos para realizar el barrido iterativo son:

- Se inicializan los voltajes nodales.



- Se aplica la primera ley de Kirchhoff desde el nodo más alejado de la fuente hasta llegar el nodo slack (Barrido de corrientes).

- Se actualiza la tensión en el nodo slack.

- Se aplica la segunda ley de Kirchhoff desde el nodo slack hasta el nodo más alejado de la fuente (Barrido de voltajes).

- Con los datos del anterior paso se actualizan los corrientes nodales.

La respuesta del método de barrido iterativo son los voltajes nodales trifásicos, con los cuales se calcula las corrientes trifásicas de rama.

### **Ordenamiento nodal**

El método del flujo de carga de barrido iterativo debe tener un ordenamiento nodal para simplificar este flujo de carga. El ordenamiento nodal se puede hacer de forma ascendente o descendente, donde el nodo slack se puede asumir como el nodo uno. Con los datos de nodo reenumerados se puede reenumerar los datos de línea. Se debe reordenar de tal forma que la columna de recibo N2 sea mayor que la columna de envío N1. Finalmente los datos de línea se ordenan por la columna de envío de forma ascendente.

### **Modelo ZIP**

Las cargas en un sistema de distribución se pueden modelar como: potencia constante, corriente constante e impedancia constante; es decir el modelo polinomial ZIP. Las cargas de potencia constante se asocian a usualmente a usuarios industriales mientras que las cargas de impedancia constante son asociados a los usuarios residenciales. Las cargas de corriente constante pueden aparecer en algunos tipos de usuarios comerciales en donde predominan cargas de iluminación.

### Impedancia constante

En este caso la potencia varía directamente con el cuadrado de la magnitud del voltaje.

$$\frac{Vn}{Zn} = \frac{V}{Z} \quad (4.2)$$

Donde:

- In: Corriente nominal.
- Vn: Voltaje nominal.
- Z: Impedancia de la carga

Los valores reales son:

$$I = \frac{V}{Z} \quad (4.3)$$

Se despeja la impedancia de las ecuaciones 4.2 y 4.3 e igualando:

$$\frac{Vn}{In} = \frac{V}{I} \quad (4.4)$$

Se define la expresión para I de la ecuación (4.4)

$$I = \left( \frac{V}{Vn} \right) \cdot In \quad (4.5)$$

Conociendo que:

$$S = V \cdot I \quad (4.6)$$

$$S_n = V_n \cdot I_n \quad (4.7)$$

Se determina  $I$  e  $I_n$  de las ecuaciones x.5 y x.6 respectivamente, y se reemplazan en la ecuación (x.4)

$$S = S_n \cdot \left( \frac{V}{V_n} \right)^2 \quad (4.8)$$

### Corriente constante

La potencia varía directamente con la magnitud del voltaje. Para este caso cuando se presenta un consumo de corriente  $I$ , si hay variaciones en la tensión de alimentación el voltaje es el mismo.

$$\frac{V_n}{Z_n} = \frac{V}{Z} \quad (4.9)$$

Como se sabe que:

$$Z_n = \frac{V_n}{I} \quad (4.10)$$

$$Z = \frac{V}{I} \quad (4.11)$$

Se reemplaza las ecuaciones 4.10 y 4.11 en 4.9 y conociendo que  $I = S / V$  se obtiene:

$$S = S_n \cdot \left( \frac{V}{V_n} \right) \quad (4.12)$$

### Potencia constante

La potencia es independiente y no varía con respecto a la magnitud del voltaje.

$$S = S_n \quad (4.13)$$

### Modelo polinomial ZIP

Con las ecuaciones 4.8, 4.12 y 4.13 se muestra el modelo polinomial, de la siguiente forma:

$$S_K = S_{ZK} \cdot \left( \frac{V_K}{V_n} \right) + S_{IK} \cdot \left( \frac{V_K}{V_n} \right) + S_{PK} \quad (4.14)$$

### Modelo del sistema

EL modelo utilizado es el flujo de carga trifásico, a continuación se muestra:

$$P_{slack} = \text{real} (V_o^*) \cdot (I_o) \quad (4.15)$$

$$\text{real} (V_o^* (Y_{OO} \cdot V_O + Y_{OM} \cdot V_O + Y_{OG} \cdot V_O)) \quad (4.16)$$

$$V_O = Z_{OO} \cdot I_O + Z_{OM} \cdot I_M + Z_{OG} \cdot I_G \quad (4.17)$$

La función objetivo utilizada para resolver el sistema planteado esta enfocado en la minimización de las oscilaciones o cambios de potencia activa en nodo slack. considerando restricciones asociadas con la corriente que fluye por los ramales del sistema y por la misma potencia inyectada por el nodo slack

$$\min \sum_1^t \Delta P_{slack} \quad (4.18)$$

*s.a*

$$I_{min} \leq I_M \leq I_{max} \quad (4.19)$$

$$P_{slack} = \text{real} (V_o^*) \cdot (I_o) \quad (4.20)$$



# Capítulo 5

## Resultados

Este capítulo presenta los resultados obtenidos implementando el primer y segundo sistema de prueba con topología radial IEEE37 en condiciones balanceadas. El primer sistema de prueba se realiza con una micro-red de 8 nodos con el fin de conocer el comportamiento de la micro-red y poder realizar la simulación a gran escala en el sistema radial IEEE37 completo como se realiza en el segundo sistema de prueba.

Tabla 5.1: Valores del primer sistema de prueba 8 nodos

Variable	Valor	Unidad	Descripción
Pbase	2500	kW	Potencia base del sistema
Vbase	4.8	kV	Voltaje base del sistema
vnomin	10.5	m/s	Velocidad nominal del aerogenerador
Paero	100	kW	Potencia nominal del Aerogenerador
Ppanel	100	kW	Potencia nominal de los Paneles solares
Psmes1	25	kW	Potencia nominal de la Smes1 en el nodo 8
Psmes2	100	kW	Potencia nominal de la Smes2 en el nodo 6
Pref1	0.01	p.u	Potencia de referencia en el nodo 8
Pref2	-0.01	p.u	Potencia de referencia en el nodo 6

- **Primer escenario:** Micro-red de 8 nodos con un sistema de compensación (Nodo 8)

En este primer escenario se mostraran los nodos más representativos del sistema como son: el nodo SLACK que permite observar cualquier variación de potencia en el sistema, debido a que es el encargado de compensar los valores de potencia, necesarios para mantener en equilibrio el sistema ante los cambios de generación y demanda, y el nodo 8 donde después de varias pruebas se logró conocer que era la mejor ubicación para el sistema de compensación SMES.

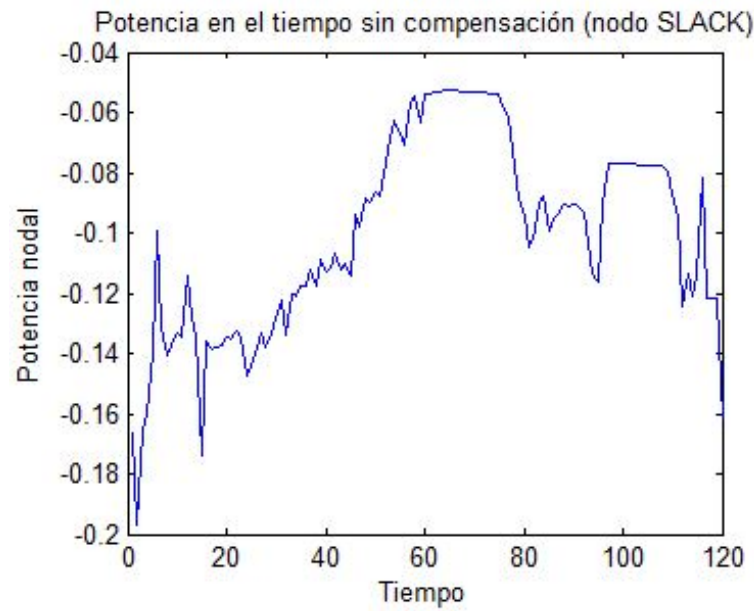


Figure 5.1: Potencia en el nodo SLACK sin compensación

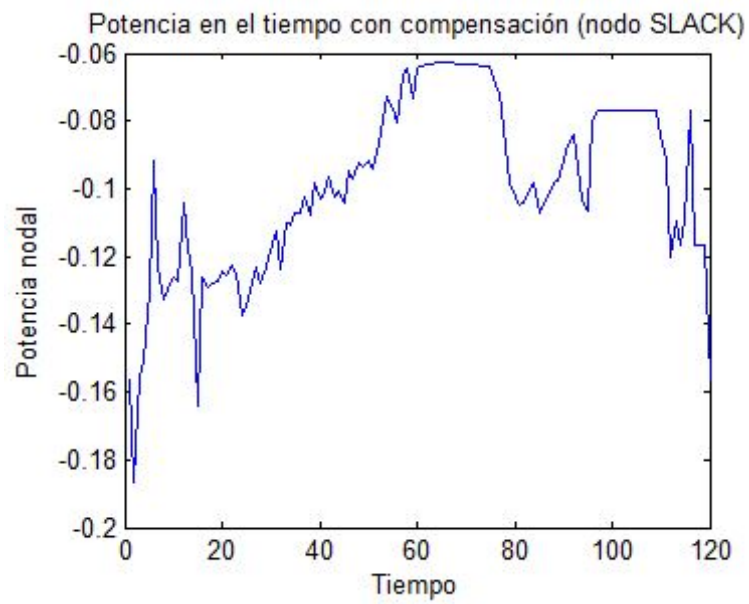


Figure 5.2: Potencia en el nodo SLACK con compensación SMES



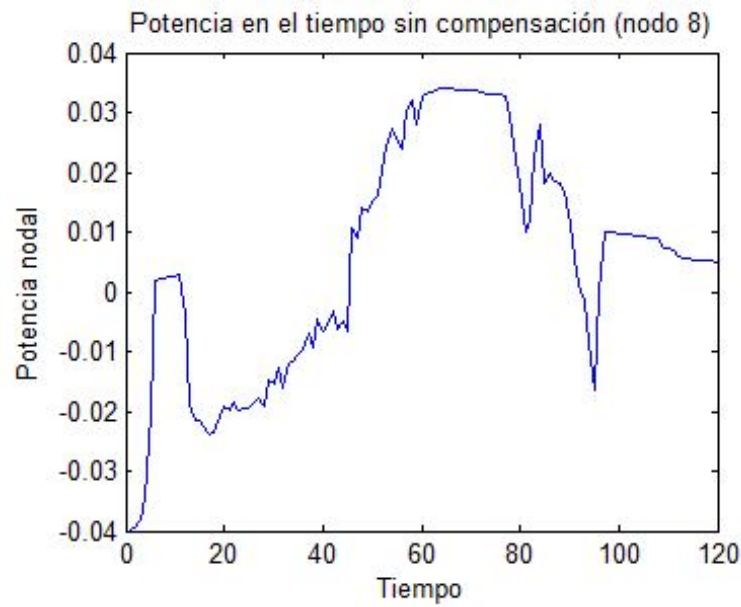


Figure 5.3: Potencia en el nodo 8 sin compensación

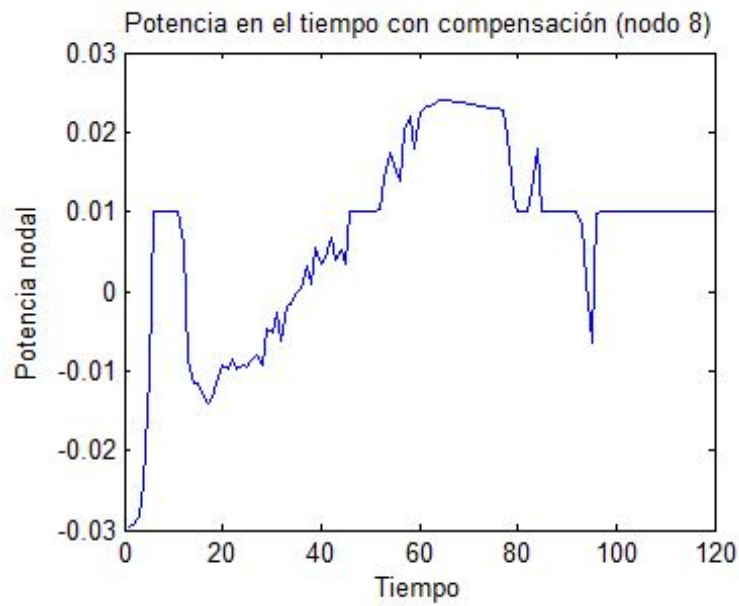


Figure 5.4: Potencia en el nodo 8 con compensación SMES.

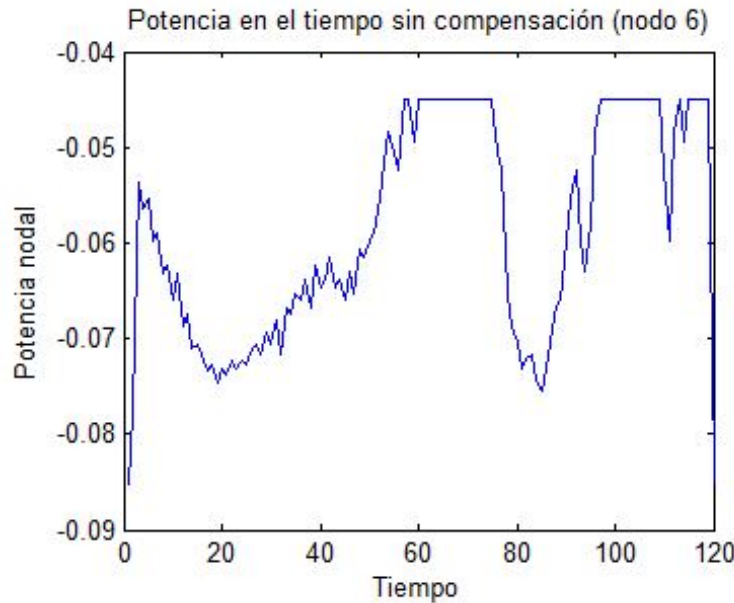


Figure 5.5: Potencia en el nodo 6 sin compensación

En la figura 5.4 se observa que con la ayuda del control local en el nodo 8, se puede compensar la potencia al valor de referencia 0.01 p.u, y en el nodo SLACK se observa como disminuye el valor de potencia que debe entrar a compensar en los diferentes intervalos de tiempo.

- **Segundo Escenario:** Segundo Escenario: Micro-red de 8 nodos con dos sistemas de compensación en el nodo 6 y nodo 8, con valores nominales mostrados en la tabla 5.1.

En este segundo escenario se muestra en la figura 5.6 que la potencia en el nodo slack es menor que la mostrada en la figura 5.2, debido a que la micro-red cuenta con dos dispositivos almacenadores de energía que tienen la capacidad de reducir las oscilaciones en el sistema y por ende la potencia que debe compensar el nodo SLACK ante estos cambios de generación y demanda. En la figura 5.7 no se observa ningún cambio en el nodo 8 debido a que él cuenta con su propio dispositivo almacenador de energía el cual es controlado por medio de un control local que permite alcanzar el valor referencia fijado como se mostró desde un principio en la figura 5.4. Por último se muestra en la figura 5.8 la compensación del nodo 6, en el cual se evidencia que es mayor la demanda comparada con la generación en el nodo 6, por ende su valor de referencia está fijado en -0.01 p.u. Donde la SMES ayuda con la generación del nodo pero no es suficiente para satisfacer la demanda.

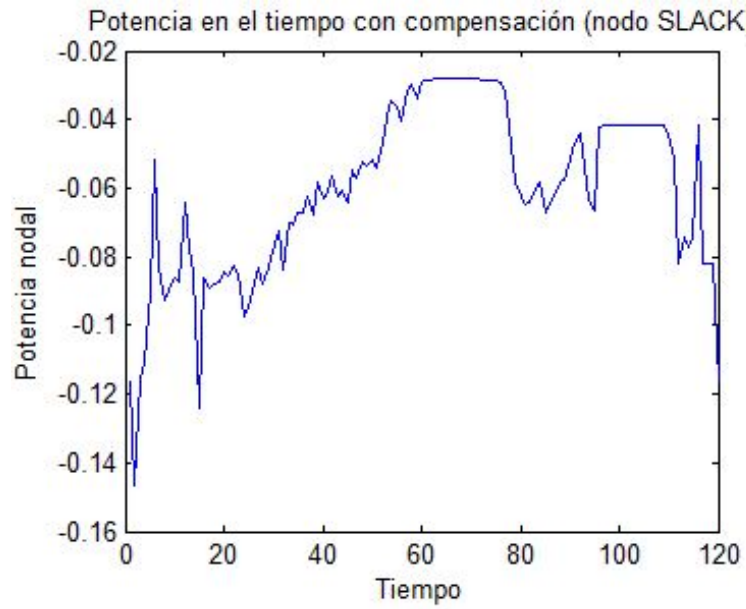


Figure 5.6: Potencia en el nodo SLACK con compensación SMES en el nodo 6 y 8.

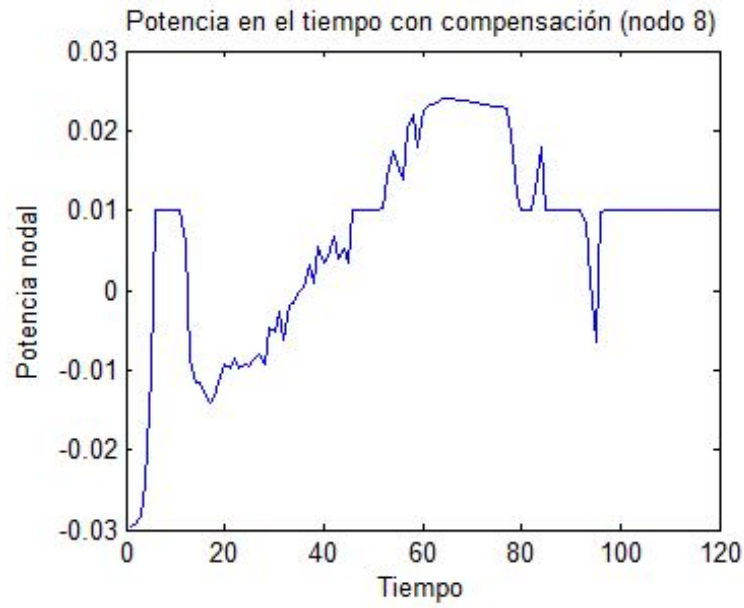


Figure 5.7: Potencia en el nodo 8 con compensación SMES en el nodo 6 y 8.

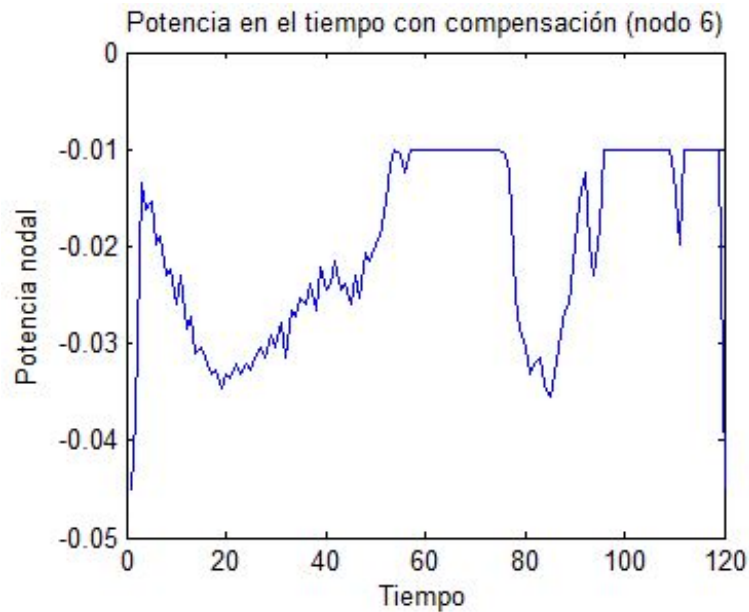


Figure 5.8: Potencia en el nodo 6 con compensación SMES en el nodo 6 y 8.

- **Tercer Escenario:** Micro-red de 8 nodos con dos sistemas de compensación de valor 125 kW verificar unidad del vatio en el nodo 6 y 50 kW nodo 8

En este escenario se puede observar que ante SMES con valores de potencia superiores a los referenciados en el segundo escenario se pueden alcanzar valores de referencia más altos como se muestra en la figura 5.11 que la gran capacidad de almacenamiento de la SMES permite suplir la demanda en el nodo y alcanzar un valor de referencia mas alto que en el escenario 2.

En la figura 5.10 se muestra como la mayor capacidad de la SMES permite alcanzar el valor de referencia en casi todos los intervalos del tiempo, dejando este nodo con pocas oscilaciones debido a las energías renovables, y en la figura 5.9 se muestra la disminución de potencia notoria en el nodo SLACK.

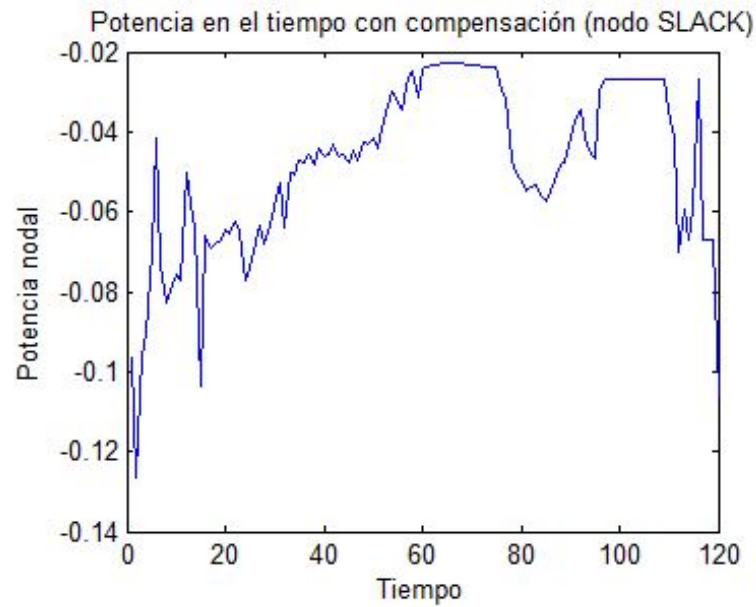


Figure 5.9: Potencia en el nodo SLACK con compensación SMES de valores superiores en el nodo 6 y 8.

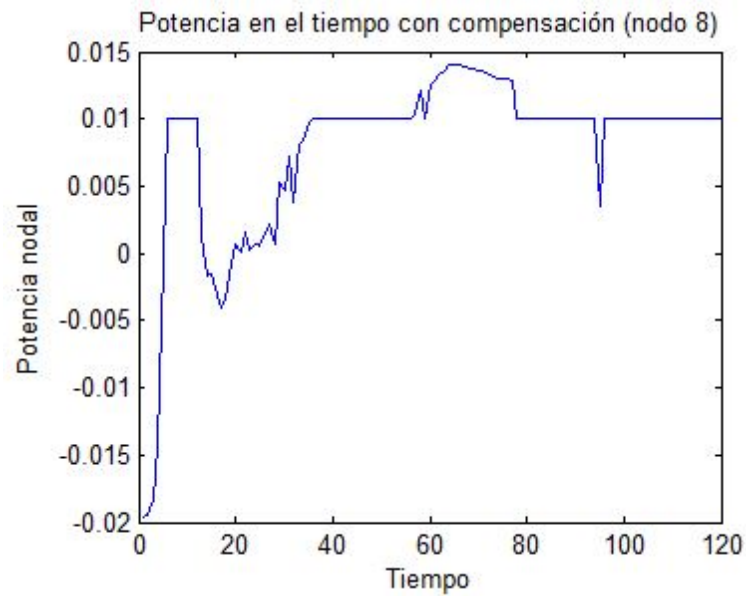


Figure 5.10: Potencia en el nodo 8 con compensación SMES de valores superiores en el nodo 6 y 8.

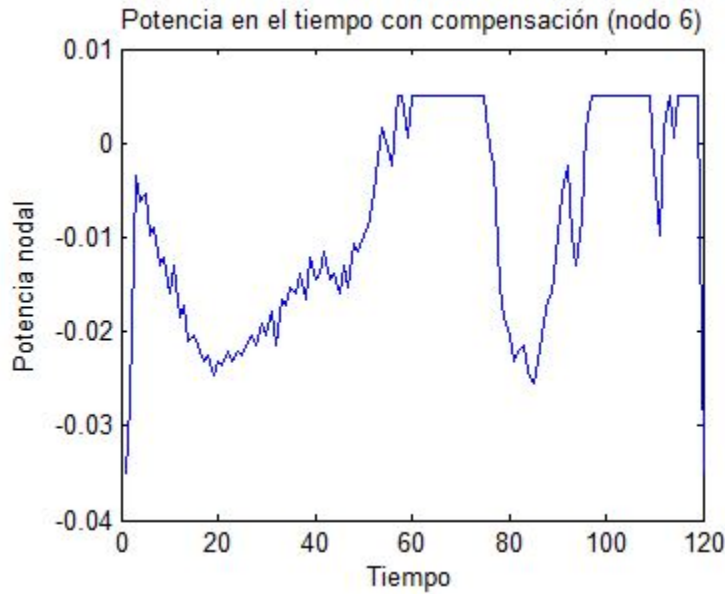


Figure 5.11: Potencia en el nodo 6 con compensación SMES de valores superiores en el nodo 6 y 8.

Finalmente, se obtuvo la potencia activa nodal en cada uno de los nodos sin compensación y con compensación por medio de los almacenadores de energía por superconducción magnética SMES, como se observa en las figuras anteriores, se implementa un modelo de optimización para disminuir las oscilaciones de potencia activa en el sistema debido a la generación distribuida. A continuación se observan los resultados obtenidos en CVX de la formulación matemática del modelo como se mostró en el capítulo 4 sección de la metodología.

Tabla 5.2: Resultados de la optimización en CVX

Valor óptimo	CVX
Escenario 1	0.0452321
Escenario 2	0.0452321
Escenario 3	0.0452321

En la tabla 5.2 se observan los resultados de la optimización realizada por CVX en cada uno de los escenarios.

- **Sistema de prueba IEEE37 Nodos:** A continuación se muestran los resultados obtenidos de la implementación del modelo completo IEEE37 con topología radial en condiciones balanceadas, como el primer sistema de prueba. Los valores utilizados para este sistema de prueba se muestran en la tabla 5.3.

Tabla 5.3: Valores del segundo sistema de prueba IEEE37 nodos

Variable	Valor	Unidad	Descripción
Pbase	2500	kW	Potencia base del sistema
Vbase	4.8	kV	Voltaje base del sistema
vnomin	10.5	m/s	Velocidad nominal del aerogenerador
Paero	100	kW	Potencia nominal del Aerogenerador
Ppanel	100	kW	Potencia nominal de los Paneles solares
Psmes1	30	kW	Potencia nominal de la Smes1 en el nodo14
Psmes2	25	kW	Potencia nominal de la Smes2 en el nodo 21
Psmes3	25	kW	Potencia nominal de la Smes3 en el nodo 26
Psmes4	40	kW	Potencia nominal de la Smes4 en el nodo 29
Psmes5	40	kW	Potencia nominal de la Smes5 en el nodo 36
Pref1	-0.05	p.u	Potencia de referencia en el nodo 14
Pref2	-0.015	p.u	Potencia de referencia en el nodo 21
Pref3	-0.06	p.u	Potencia de referencia en el nodo 26
Pref4	0.01	p.u	Potencia de referencia en el nodo 29
Pref5	-0.05	p.u	Potencia de referencia en el nodo 35

En las figuras 5.12; 5.14; 5.16; 5.18; 5.20, se observan los nodos representativos de la micro-red sin ningún tipo de compensación. De esta misma manera en estos nodos fueron instalados los equipos de compensación SMES, lo que permite observar consecuentemente en las figuras 5.13; 5.15; 5.17; 5.19; 5.21 compensación de potencia en cada uno de los nodos a partir de un control local.

En la figura 5.22 se puede observar la potencia en el nodo SLACK Sin ningún elemento de compensación En este sistema de prueba más robusto se puede observar en la mayoría de nodos que las cargas que tiene el sistema son muy altas en comparación de la capacidad de los elementos de generación distribuida con energías renovables. Por este motivo los resultados que se obtienen en cada uno de los nodos son valores negativos a excepción del nodo 29 figura 5.19 donde la capacidad de generación del nodo es más alta que la demanda y se muestra el resultado de potencia positiva en el nodo.

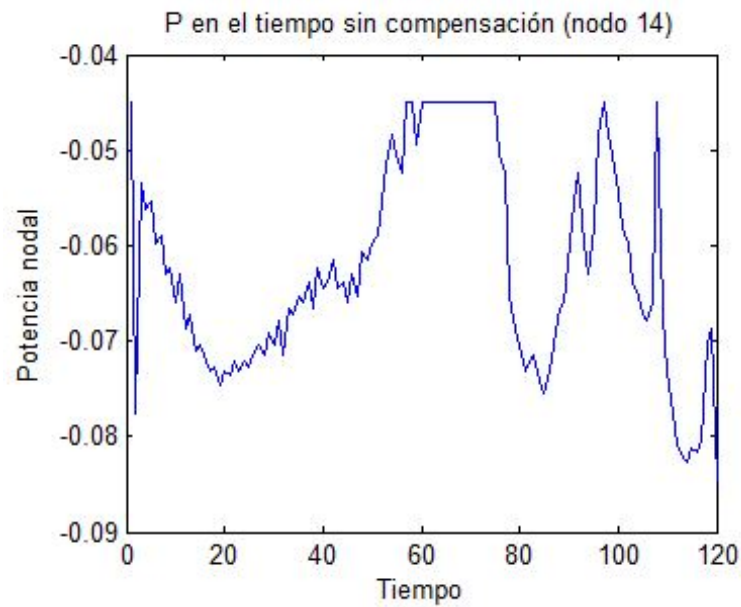


Figure 5.12: Potencia en el nodo 14 sin compensación.

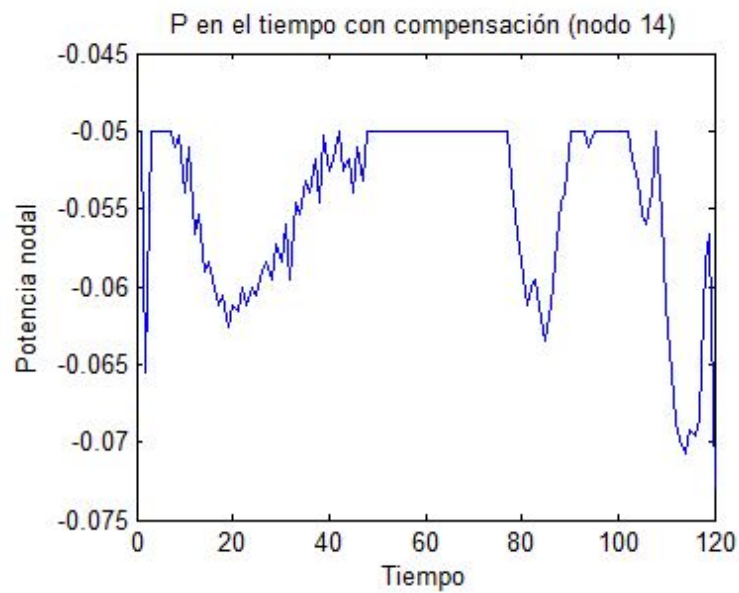


Figure 5.13: Potencia en el nodo 14 con compensación.



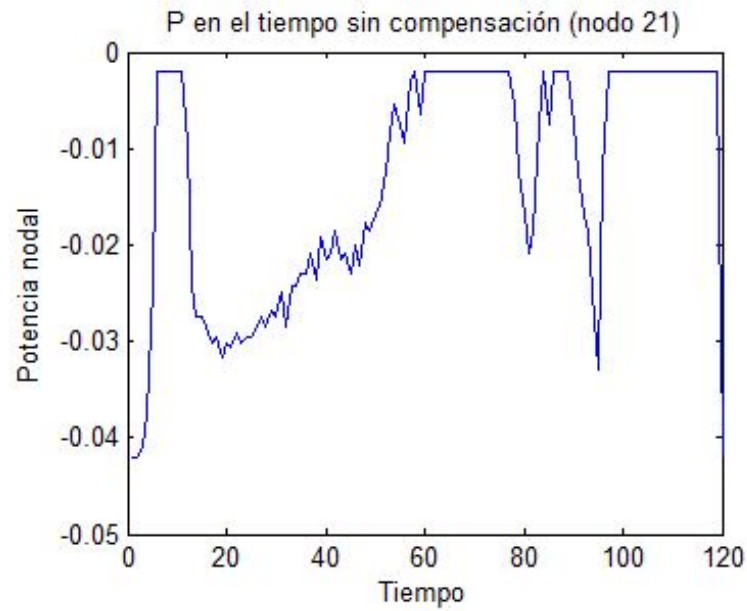


Figure 5.14: Potencia en el nodo 21 sin compensación.

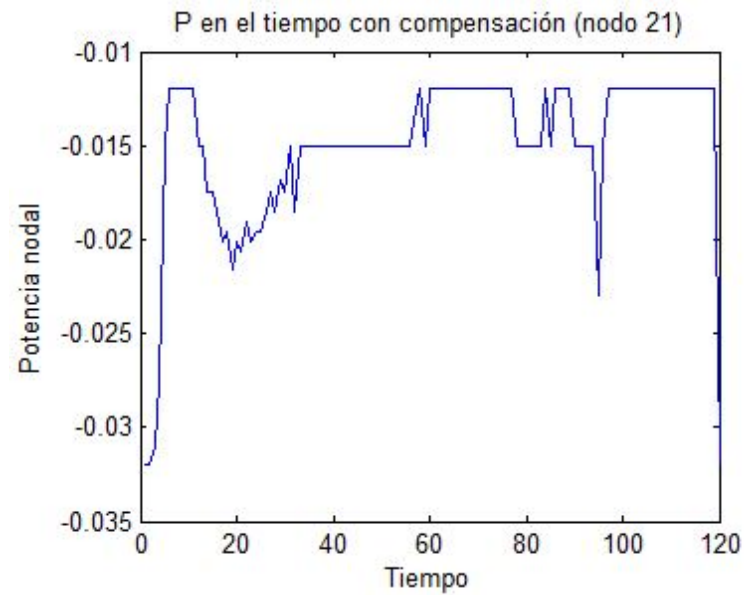


Figure 5.15: Potencia en el nodo 21 con compensación.

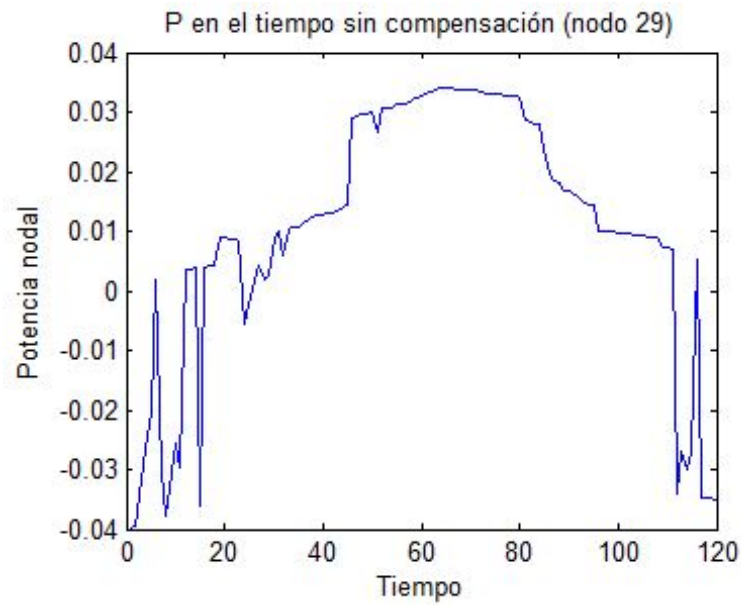


Figure 5.16: Potencia en el nodo 26 sin compensación.

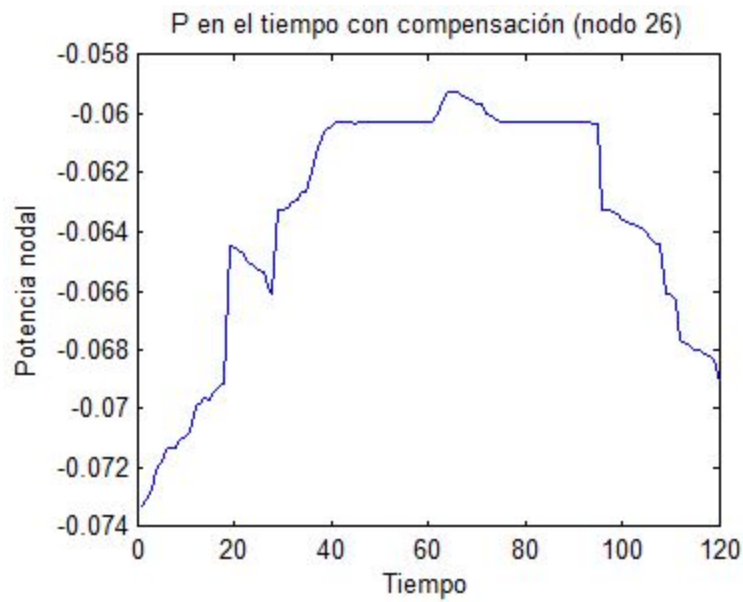


Figure 5.17: Potencia en el nodo 26 con compensación.

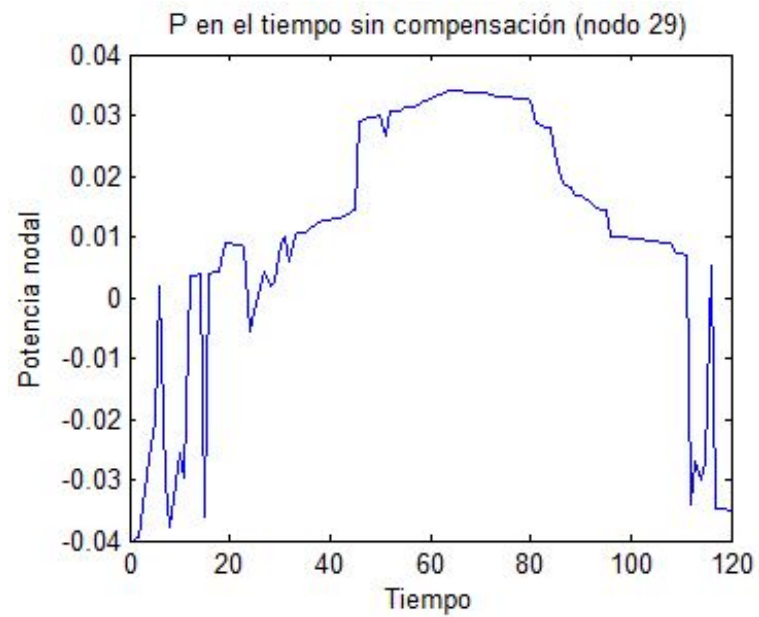


Figure 5.18: Potencia en el nodo 29 sin compensación.

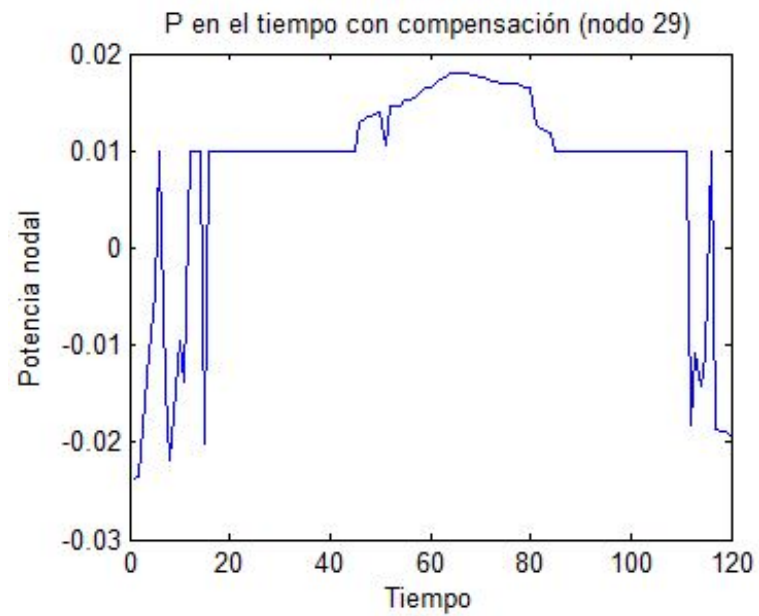


Figure 5.19: Potencia en el nodo 29 con compensación.

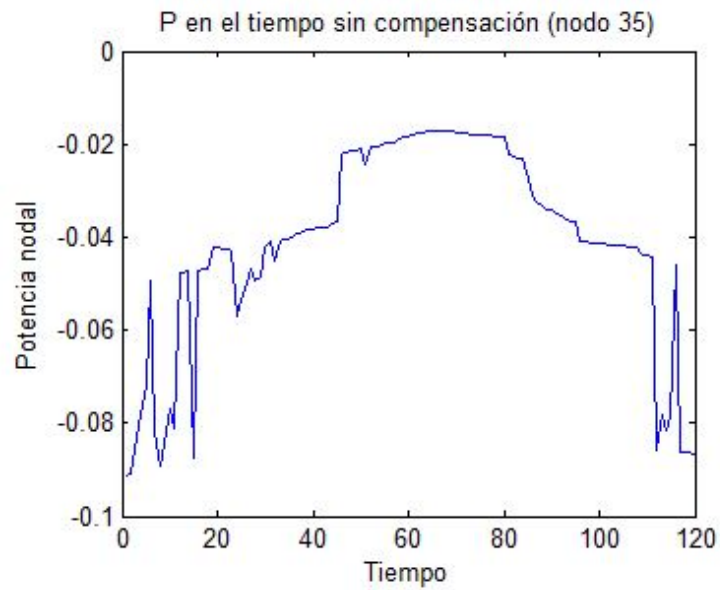


Figure 5.20: Potencia en el nodo 35 sin compensación.

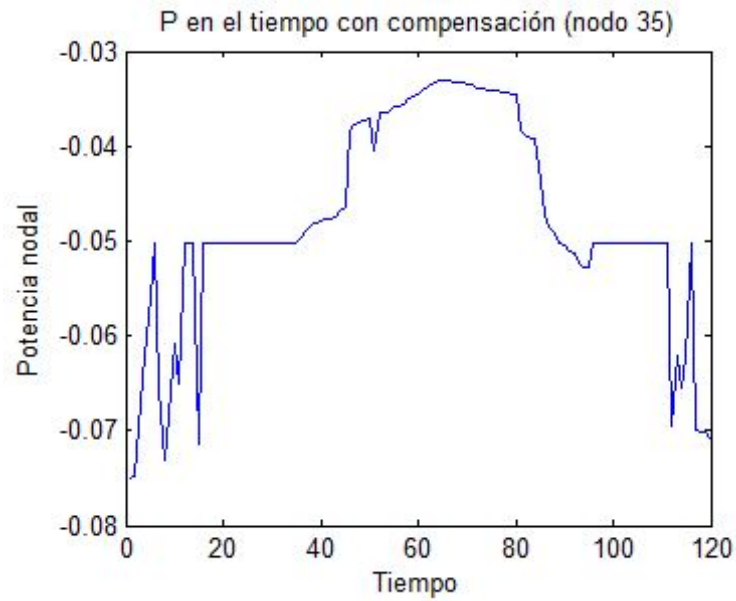


Figure 5.21: Potencia en el nodo 35 con compensación.

Con relación a lo estipulado en el párrafo anterior se puede observar en la figura 5.23 el resultado de la compensación en todo el sistema, debido a que todos los cambios de potencia en la micro-red son asumidos por el nodo SLACK como se explicaba en el primer sistema de prueba. Por este motivo se observa en la figura 5.23, que en algunos intervalos de tiempo la potencia del nodo SLACK es menor, cuando efectivamente los elementos de compensación se encuentran entregando energía al sistema para alcanzar los sistemas de referencia en cada uno de sus nodos con ayuda del control local, caso contrario en algunos intervalos de la gráfica donde aumenta la potencia que debe asumir el nodo SLACK, debido a que las SMES se encuentran absorbiendo energía del sistema para alcanzar sus sistemas de referencias.

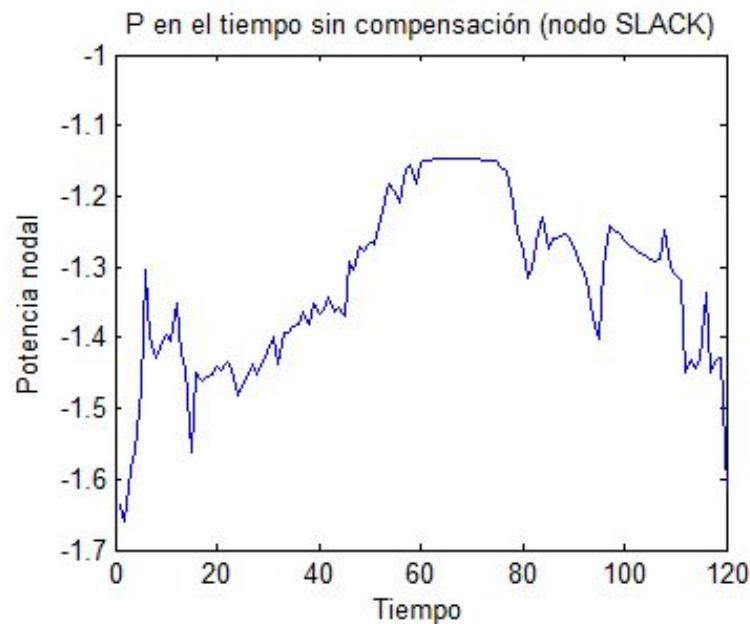


Figure 5.22: Potencia en el nodo SLACK sin compensación.

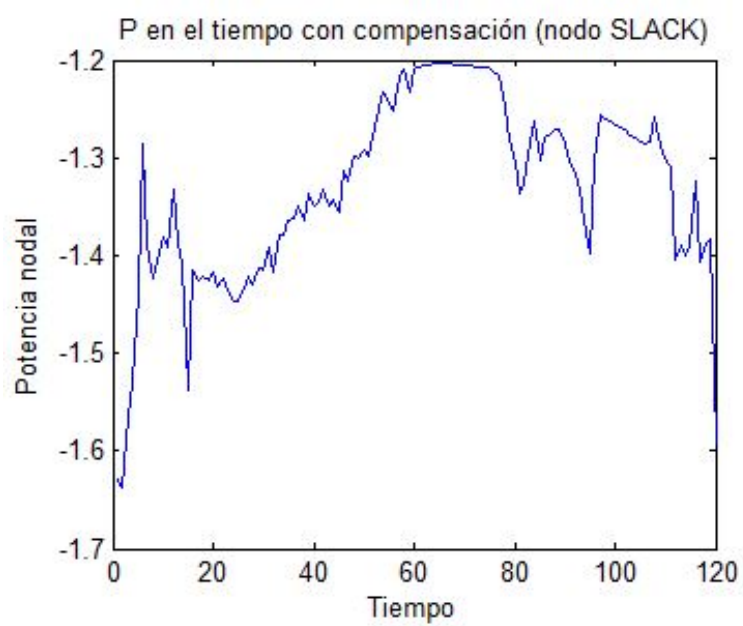


Figure 5.23: Potencia en el nodo SLACK con compensación.

# Capítulo 6

## Conclusiones

- Con la realización de este proyecto queda comprobado la capacidad que tienen las SMES para mitigar las oscilaciones en una micro-red, producidas por la generación distribuida.

- Con los resultados obtenidos en el proyecto queda ratificado que los dispositivos almacenadores de energía se hacen indispensables para diversificar la matriz energética del país, a partir de la integración de nuevos sistemas de generación de energía con fuentes no convencionales de energía renovable.

- Con la implementación de los sistemas de prueba de este proyecto se pudo evidenciar la rapidez con la cual el dispositivo SMES puede cargar y descargar grandes cantidades de energía, convirtiéndose en una de las mejores alternativas para la compensación de energía en las micro-redes.

- Con el desarrollo de los dos sistemas de prueba planteados en el proyecto se pudo observar que para el sistema de prueba 1 donde el número de nodos es reducido, el impacto de la aplicación de las SMES sobre la potencia del nodo slack es más significativo comparada con el impacto producido en el sistema de prueba 2 donde el número de nodos es mayor y se evidencia un cambio menor en la potencia del nodo slack.

- En el tercer escenario del sistema de prueba 1 se logró demostrar que con smes de capacidades muy altas de potencia se pueden obtener menores variaciones en la potencia de los nodos con control local en el sistema y por ende se refleja una variación menor de potencia

en el nodo slack.

## 6.1 Futuros trabajos de investigación

Los futuros trabajos de investigación derivados de este trabajo son:

- Diseñar un sistema de micro-red que involucre otros sistemas de generación a base de energías renovables, para estudiar su comportamiento con la SMES.
- Diseñar un sistema de control global más robusto que permita alcanzar la referencia deseada en cualquiera de los nodos del sistema.
- Realizar el estudio considerando un sistema de micro-red más grande y en el cual se analice por un periodo de tiempo más largo.
- Estudiar los efectos de la compensación de potencia en la red y en los demás elementos del sistema por parte de la SMES
- Diseñar un control óptimo donde se puedan minimizar las pérdidas de energía en la SMES.



# Capítulo 7

## Anexo A

- Sistema de Prueba 1

Tabla 7.1: Datos del flujo de carga - primer sistema de prueba

N1	N2	rkm	xkm	bkm/2	Pij	Qij	alpha
1	2	0.0025	0.0026	0.001	0.000	0.000	0
2	3	0.0034	0.0036	0.0001	0.000	0.000	0
3	4	0.0040	0.0023	0.000	0.820	0.400	2
4	5	0.0013	0.0008	0.000	0.000	0.000	0
5	6	0.0040	0.0023	0.000	0.0850	0.400	2
5	7	0.0022	0.0012	0.000	0.000	0.000	0
7	8	0.0042	0.0013	0.0013	0.0420	0.0210	0

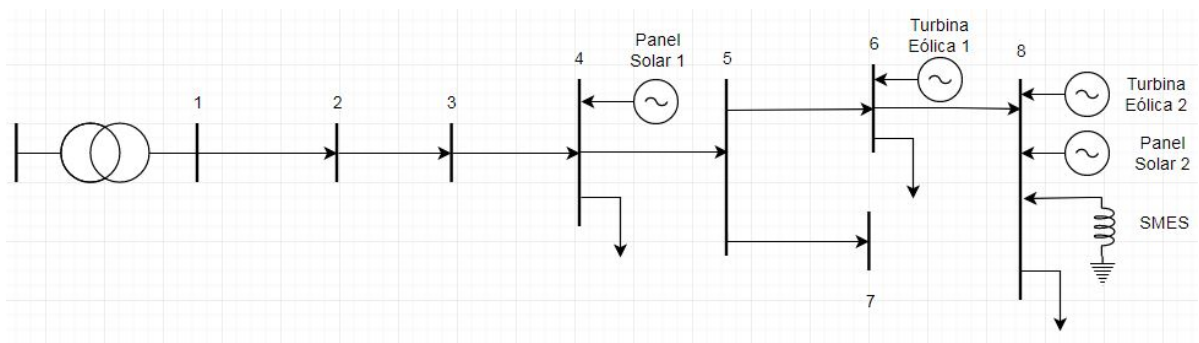


Figure 7.1: Sistema de prueba 1, escenario 1.

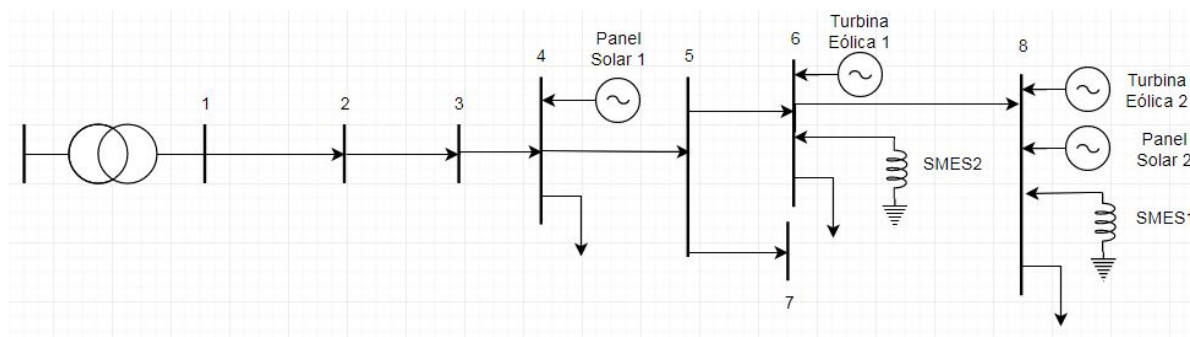


Figure 7.2: Sistema de prueba 1, escenario 2.

Tabla 7.2: Datos del flujo de carga - segundo sistema de prueba

<b>N1</b>	<b>N2</b>	<b>rkm</b>	<b>xkm</b>	<b>bkm/2</b>	<b>Pij</b>	<b>Qij</b>	<b>alpha</b>
1	2	0.0025	0.0026	0.0001	0.0000	0.0000	0
2	3	0.0034	0.0036	0.0001	0.0000	0.0000	0
3	4	0.0013	0.0008	0.0000	0.0000	0.0000	0
4	5	0.0040	0.0023	0.0000	0.0850	0.0400	2
5	6	0.0022	0.0012	0.0000	0.0000	0.0000	0
5	7	0.0042	0.0013	0.0000	0.0420	0.0210	0
7	8	0.0042	0.0013	0.0000	0.0420	0.0210	0
7	9	0.0022	0.0012	0.0000	0.0850	0.0400	1
9	10	0.0043	0.0025	0.0000	0.1400	0.0700	1
10	11	0.0043	0.0025	0.0000	0.1400	0.0700	1
11	12	0.0027	0.0015	0.0000	0.1260	0.0620	0
12	13	0.0027	0.0015	0.0000	0.0000	0.0000	0
13	14	0.0026	0.0008	0.0000	0.0850	0.0400	0
13	15	0.0027	0.0015	0.0000	0.0420	0.0210	1
10	16	0.0068	0.0022	0.0000	0.0000	0.0000	0
16	17	0.0068	0.0022	0.0000	0.0000	0.0000	0
16	18	0.0026	0.0008	0.0000	0.0850	0.0400	0
3	19	0.0031	0.0010	0.0000	0.0420	0.0210	0
19	20	0.0019	0.0011	0.0000	0.0420	0.0210	0
20	21	0.0026	0.0008	0.0000	0.0420	0.0630	0
20	22	0.0037	0.0012	0.0000	0.0420	0.0210	1
2	23	0.0024	0.0014	0.0000	0.0850	0.0400	0
23	24	0.0035	0.0020	0.0000	0.0000	0.0000	0
24	25	0.0010	0.0003	0.0000	0.0380	0.0180	1
25	26	0.0068	0.0022	0.0000	0.0850	0.0400	2
24	27	0.0054	0.0031	0.0000	0.0850	0.0400	0
27	28	0.0040	0.0023	0.0000	0.0000	0.0000	0
28	29	0.0037	0.0012	0.0000	0.0420	0.0210	0
27	30	0.0120	0.0039	0.0000	0.0000	0.0000	0
30	31	0.0016	0.0005	0.0000	0.1610	0.0800	1
30	32	0.0099	0.0032	0.0000	0.0420	0.0210	2
2	33	0.0052	0.0017	0.0000	0.0000	0.0000	0
33	34	0.0031	0.0010	0.0000	0.0850	0.0400	0
33	35	0.0042	0.0013	0.0000	0.0930	0.0440	2

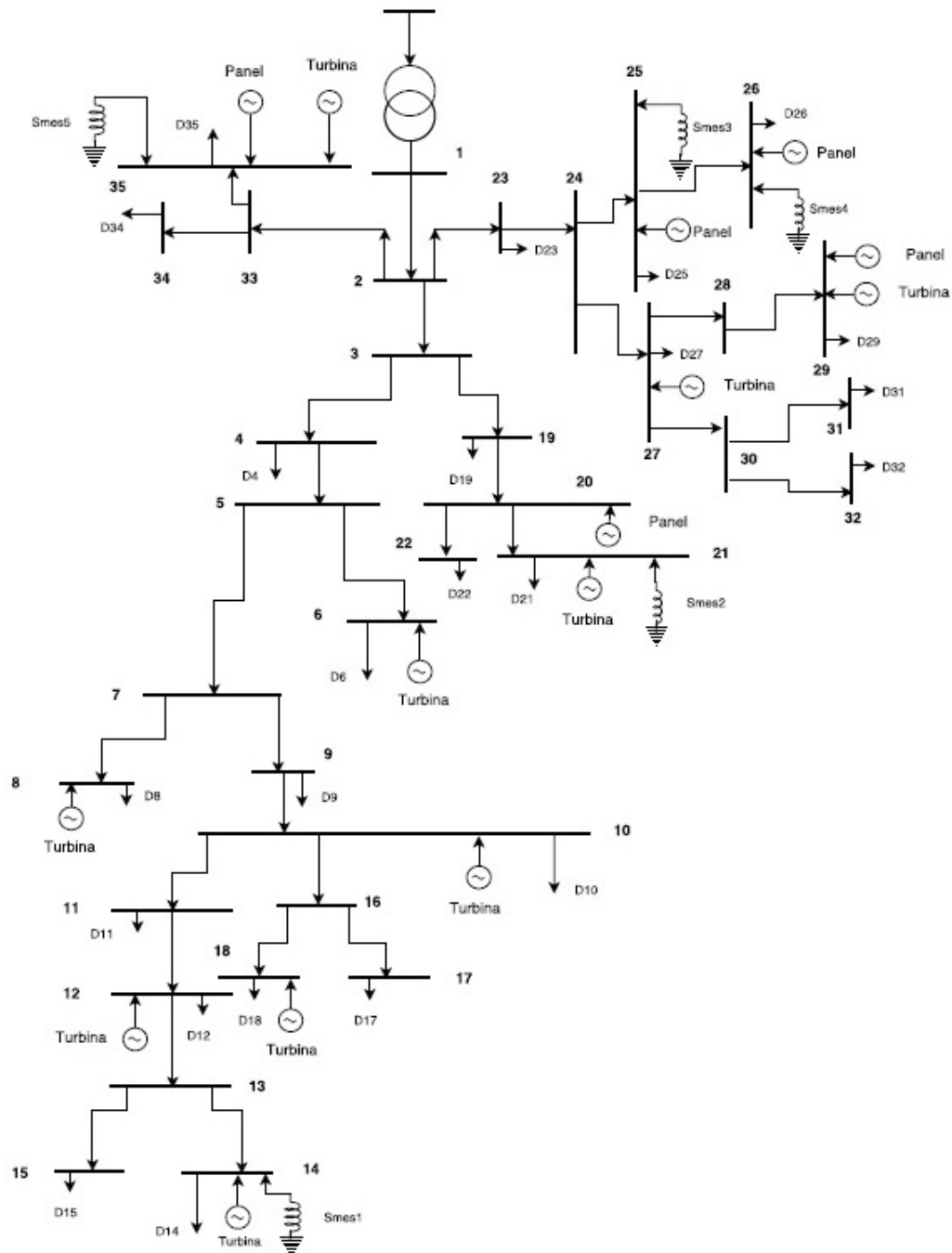


Figure 7.3: Sistema de prueba 2, IEEE37 nodos.

# Bibliografía

- [1] M. H. Ali, B. Wu, and R. A. Dougal, “An overview of smes applications in power and energy systems,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 1, no. 1, pp. 38–47, 2010.
- [2] R. Majumder, “Some aspects of stability in microgrids,” *IEEE Transactions on power systems*, vol. 28, no. 3, pp. 3243–3252, 2013.
- [3] D. S. Padimiti and B. H. Chowdhury, “Superconducting magnetic energy storage system (smes) for improved dynamic system performance,” in *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, pp. 1–6, IEEE, 2007.
- [4] A. Kalafala, J. Bascunan, D. Bell, L. Blecher, F. Murray, M. Parizh, M. Sampson, and R. Wilcox, “Micro superconducting magnetic energy storage (smes) system for protection of critical industrial and military loads,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 32, no. 4, pp. 2276–2279, 1996.
- [5] M. H. Ali, M. Park, I.-K. Yu, T. Murata, and J. Tamura, “Improvement of wind-generator stability by fuzzy-logic-controlled smes,” *IEEE transactions on industry applications*, vol. 45, no. 3, pp. 1045–1051, 2009.
- [6] M. H. Ali, T. Murata, and J. Tamura, “Stabilization of power system including wind generator by fuzzy logic-controlled superconducting magnetic energy storage,” in *Power Electronics and Drives Systems, 2005. PEDS 2005. International Conference on*, vol. 2, pp. 1611–1616, IEEE, 2005.
- [7] I. Ngamroo, A. C. Supriyadi, S. Dechanupaprittha, and Y. Mitani, “Stabilization of tie-line power oscillations by robust smes in interconnected power system with large wind farms,” in *Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, 2009*, pp. 1–4, IEEE, 2009.

- [8] F. Zhou, G. Joós, C. Abbey, L. Jiao, and B. T. Ooi, "Use of large capacity smes to improve the power quality and stability of wind farms," in *Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE*, pp. 2025–2030, IEEE, 2004.
- [9] M. Sheikh, N. Mondol, and F. Eva, "Stabilization of wind generator by pwm-vsc controlled smes," in *Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET), 2012 2nd International Conference on the*, pp. 1–5, IEEE, 2012.
- [10] M. M. Aly, H. S. Salama, and M. Abdel-Akher, "Power control of fluctuating wind/pv generations in an isolated microgrid based on superconducting magnetic energy storage," in *Power Systems Conference (MEPCON), 2016 Eighteenth International Middle East*, pp. 419–424, IEEE, 2016.
- [11] J. A. P. Lopes, A. G. Madureira, and C. C. L. M. Moreira, "A view of microgrids," *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, vol. 2, no. 1, pp. 86–103, 2013.
- [12] R. H. Lasseter, "Smart distribution: Coupled microgrids," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 1074–1082, 2011.
- [13] M. Aneke and M. Wang, "Energy storage technologies and real life applications—a state of the art review," *Applied Energy*, vol. 179, pp. 350–377, 2016.
- [14] N. Hatziargyriou, H. Asano, R. Iravani, and C. Marnay, "Microgrids," *IEEE power and energy magazine*, vol. 5, no. 4, pp. 78–94, 2007.
- [15] M. Glinkowski, J. Hou, and G. Rackliffe, "Advances in wind energy technologies in the context of smart grid," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 1083–1097, 2011.
- [16] F. Blaabjerg, Y. Yang, D. Yang, and X. Wang, "Distributed power-generation systems and protection," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 7, pp. 1311–1331, 2017.
- [17] J. W. Bray, "Superconductors in applications; some practical aspects," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 19, no. 3, pp. 2533–2539, 2009.
- [18] S. Vazquez, S. M. Lukic, E. Galvan, L. G. Franquelo, and J. M. Carrasco, "Energy storage systems for transport and grid applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 12, pp. 3881–3895, 2010.
- [19] W. Hassenzahl, "Will superconducting magnetic energy storage be used on electric utility systems?," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 11, no. 2, pp. 482–488, 1975.

- [20] W. Gil-González, O. Montoya, A. Garcés, and G. Espinosa-Pérez, “Ida-passivity-based control for superconducting magnetic energy storage with pwm-csc,” in *Green Technologies Conference (GreenTech), 2017 Ninth Annual IEEE*, pp. 89–95, IEEE, 2017.
- [21] W. H. Kersting, “Radial distribution test feeders,” in *Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE*, vol. 2, pp. 908–912, IEEE, 2001.
- [22] Y. Xie, M. Song, J. Shi, G. Jiang, P. Geng, and M. Zhang, “Simulation on a micro-grid system based on superconducting magnetic energy storage,” in *Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), 2014 International*, pp. 1451–1455, IEEE, 2014.